

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM SALVADOR, BAHIA: CONDIÇÕES  
ATMOSFÉRICAS E IMPACTOS AMBIENTAIS**

**ANDRÉA HELENA MACHADO DOS SANTOS**

CAMPINA GRANDE – PB  
OUTUBRO DE 2008

ANDRÉA HELENA MACHADO DOS SANTOS

**EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM SALVADOR, BAHIA: CONDIÇÕES  
ATMOSFÉRICAS E IMPACTOS AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Maria Regina da Silva Aragão

CAMPINA GRANDE – PB

OUTUBRO DE 2008

**EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM SALVADOR, BAHIA: CONDIÇÕES  
ATMOSFÉRICAS E IMPACTOS AMBIENTAIS**

S596e

2008

Santos, Andréa Helena Machado dos.

Eventos extremos de chuva em Salvador, Bahia: condições atmosféricas e impactos ambientais / Andréa Helena Machado dos Santos. — Campina Grande, 2008.

65 f. : il. color

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de e Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria Regina da Silva Aragão.

1. Área Urbana. 2. Mesoescala. 3. Nordeste do Brasil. 4. Desastre Natural. 5. Perfil Termodinâmico. 6. Energia Potencial Convectiva Disponível – CAPE. I. Título.

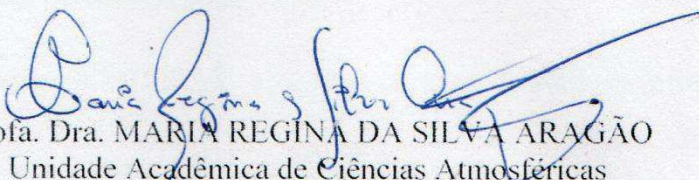
CDU – 551.59(043)

ANDRÉA HELENA MACHADO DOS SANTOS


EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM SALVADOR, BAHIA: CONDIÇÕES  
ATMOSFÉRICAS E IMPACTOS AMBIENTAIS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/10/2008

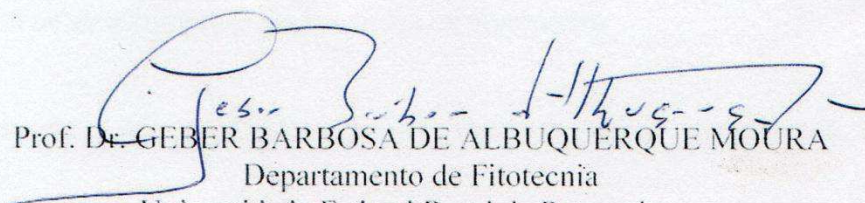
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof.ª. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. GEBER BARBOSA DE ALBUQUERQUE MOURA  
Departamento de Fitotecnia  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

*A DEUS,*

*Dedico*

*A meus pais Luiz Sergio Monteiro de Vasconcelos e Luiza Antônia Pinheiro Machado,*

*Ofereço*

## AGRADECIMENTOS

Os meus mais sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho e principalmente:

A Deus, pelo dom da existência, por nunca me deixar abater em meio as adversidades e por sempre me dar forças para continuar lutando e vencendo.

À professora Dra. Maria Regina da Silva Aragão pelos ensinamentos dispensados e pela orientação na realização deste trabalho.

Aos professores Dra. Magaly de Fatima Correia e Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura pelas valiosas sugestões.

Ao CNPq pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da UFCG pela oportunidade de realização do curso.

À Defesa Civil de Salvador (CODESAL) pelo fornecimento de valiosas informações.

Ao Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ) pela cessão de dados.

Ao professor Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti e ao doutorando Ewerton Cleudson de Sousa Melo pela indispensável ajuda.

À Divanete Cruz Rocha pelo ajuda, companheirismo e paciência no decorrer do curso.

À Eyres Ventura Silva pelo processamento dos dados da estação automática de superfície do Instituto de Gestão das Águas e Clima.

À minha família pelo apoio e incentivo aos estudos.

Ao Hallan pelo amor e compreensão em todos os momentos.

À família Menezes: Ronaldo, Ruth, Tainá e Humberto, pelos maravilhosos momentos compartilhados.

Aos meus amigos da pós-graduação: Roberta Araújo, David Nogueira, Carla Martins, Leidiane Leão, João Athaydes, Maryfrance Diniz, Djane Fonseca e Aldinete Barreto.

*“Se você pudesse me dizer  
Se você soubesse o que fazer  
O que você faria?  
Aonde iria chegar?  
Se você soubesse quem você é  
Até onde vai a sua fé  
O que você faria?  
Pagaria pra ver?”*

*Se pudesse escolher  
Entre o bem e o mal  
Ser ou não ser?*

*Se querer é poder  
Tem que ir até o final  
Se quiser vencer...”*

*Vida Real (Paulo Ricardo)*



## RESUMO

Neste estudo foram analisados eventos extremos de chuva e seus impactos adversos registrados na cidade de Salvador-BA nos dias 21 de abril e 12 de junho de 2006. A interação entre a mesoescala e a escala sinótica foi investigada. Dados observacionais de superfície, fornecidos pelo INGÁ, e de altitude, dados em pontos de grade do NCEP/NCAR, imagens de satélite meteorológico e registros de ocorrências de desastres fornecidos pela Defesa Civil de Salvador (CODESAL) foram utilizados na análise.

No evento extremo de 21 de abril, 55 mm de chuva foram registrados entre as 5 e 7 horas da manhã, provocando deslizamentos de terra, desabamento de imóveis e alagamentos. Ventos muito fracos na troposfera em Salvador e ventos fortes na alta troposfera em Caravelas foram observados no dia anterior ao evento, juntamente com alto teor de umidade e energia potencial convectiva disponível máxima de 1.680 J/kg em Salvador. Um cavado formado na área litorânea leste do Nordeste devido à penetração de um sistema frontal austral favoreceu o desenvolvimento da convecção através de movimentos ascendentes em toda a troposfera e convergência de umidade na baixa troposfera. No evento extremo de 12 de junho foram registrados 51 mm de chuva entre a meia noite e 3 horas da madrugada. Um número elevado de ocorrências foi registrado pela CODESAL. Ventos fracos em toda a troposfera em Salvador e Caravelas e energia potencial convectiva disponível máxima de 3.233 J/kg em Salvador foram diagnosticados no dia anterior ao evento. Áreas de convecção profunda organizada em mesoescala caracterizaram esse evento provocado pela penetração de um distúrbio de leste cuja propagação foi evidente no campo do vento no nível de 500 hPa e em imagens de satélite meteorológico.

## ABSTRACT

Extreme rainfall events and their environmental impacts upon the city of Salvador, Bahia, on 21 April and 12 June 2006 are analyzed in this study. Interaction between the mesoscale and the synoptic scale was investigated. Surface and upper air observational data, NCEP/NCAR grid point data, meteorological satellite images and data on environmental impacts provided by the Civil Defense of Salvador (CODESAL) were used in the analysis. During the heavy rainfall event of 21 April, 55 mm of rain fell between 5 and 7 LT in the morning, causing landslides and inundations. Very weak winds throughout the troposphere in Salvador and strong winds in the upper troposphere in Caravelas were observed in the day before the event, in conjunction with high moisture content and maximum convective available potential energy of 1,680 J/kg in Salvador. This event is caused by a trough formed in the eastern coastal area of Northeast Brazil in association with the northeastward advance of an austral frontal system. Ascending motion throughout the troposphere and moisture convergence in the lower troposphere favored convection development.

During the extreme event of 12 June, 51 mm of rain fell between midnight and 3 LT. A high number of occurrences were registered by the CODESAL. Weak winds throughout the troposphere in Salvador and Caravelas and maximum convective available potential energy of 3,233 J/kg in Salvador were diagnosed in the day before the event. Deep convection organized on the mesoscale characterizes this event caused by the penetration of an easterly disturbance whose westward propagation was evident on the wind field at 500 hPa level and on meteorological satellite images.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE SIGLAS.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS.....	xvii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICAS DA CIDADE DE SALVADOR, BAHIA.....	04
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	09
CAPÍTULO 4 – DADOS E METODOLOGIA.....	15
4.1 – Dados.....	15
4.2 – Metodologia.....	17
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
5.1 – Abril de 2006.....	21
5.2 – Junho de 2006.....	39
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Normal climatológica da precipitação na cidade de Salvador-BA (12°55'S, 38°31'W) no período 1961-1990 ( <i>Fonte dos dados: Departamento Nacional de Meteorologia, 1992</i> ).....	4
Figura 2.2 - Assentamentos urbanos de baixa renda desprovidos de infra-estrutura básica no Bairro do Tiradentes em Salvador-BA. (Fonte: <a href="http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br">www.defesacivil.salvador.ba.gov.br</a> ).....	8
Figura 4.1 - Localização de oito estações meteorológicas de superfície na cidade de Salvador-BA. As estações estão indicadas por um ponto preto no mapa: INMET, 19BC, CRA, Aterro Canabrava, SRH-PCD, Aterro Centro, São Bartolomeu e Base Naval. ( <i>Fonte do mapa: (www.defesacivil.salvador.ba.gov.br)</i> ).....	16
Figura 5.1 – Número de ocorrências mais relevantes relacionadas com chuvas fortes no mês de abril de 2006 na cidade de Salvador. ( <i>Fonte dos dados: Departamento de Informação da Defesa Civil de Salvador</i> ).....	22
Figura 5.2 - Totais diários de precipitação (mm) do mês de abril de 2006 em quatro estações meteorológicas da cidade de Salvador. ( <i>Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ</i> ).....	23
Figura 5.3 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias do vento em superfície (m/s) registrado pela SHR- PCD de Salvador no mês de abril de 2006. ( <i>Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ</i> ).....	24
Figura 5.4 - Precipitação horária acumulada (mm) registrada pela SRH- PCD de Salvador no período de 18 UTC do dia 20 às 18 UTC do dia 22 de abril de 2006. ( <i>Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ</i> ).....	25
Figura 5.5 - Perfis verticais da temperatura potencial ( $\theta$ ), temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e temperatura potencial equivalente de saturação ( $\theta_{es}$ ) obtidos de sondagens de ar superior realizadas em Salvador (a,c) e Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 20 e (c,d) 21 de abril de 2006. ( <i>Fonte dos dados: <a href="http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html">www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html</a></i> ).....	27

- Figura 5.6 - Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s) obtidos de sondagens de ar superior realizadas na cidade de Salvador (a,c) e Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 20 e (c,d) 21 de abril de 2006. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte). (*Fonte dos dados:* [www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html))..... 28
- Figura 5.7 - Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 21 de abril de 2006 às: (a) 00 UTC; (b) 03 UTC; (c) 09 UTC e (d) 12 UTC. A localização aproximada de Salvador está indicada pela ponta da seta vermelha nas imagens. (*Fonte das imagens: Adaptado de* [www.sat.dundee.ac.uk](http://www.sat.dundee.ac.uk))..... 30
- Figura 5.8 - Pressão reduzida ao nível médio do mar às 00 UTC do dia 21 de abril de 2006. O intervalo de análise é de 2 hPa. A linha tracejada assinala um eixo de cavado. (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 32
- Figura 5.9 - Análise de linhas de corrente e intensidade do vento para as 00 UTC do dia 21 de abril de 2006 nos níveis de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A velocidade do vento está representada por: cinza escuro para  $60 \text{ m/s} \leq V$  ( $30 \text{ m/s} \leq V$ ) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para  $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$  ( $20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500 e 850 hPa) e cinza claro para  $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$  ( $10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500, 850 e 925 hPa). (*Fonte dos dados (NCEP/NCAR)*)..... 34
- Figura 5.10 - Componente vertical da vorticidade relativa às 00 UTC do dia 21 de abril de 2006 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O intervalo de análise é de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 35
- Figura 5.11 - Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de  $12^\circ\text{S}$  no dia 21 de abril de 2006 no horário de: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de  $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas)

correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). ( <i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i> ).....	36
Figura 5.12 - Umidade específica às 00 UTC do dia 21 de abril de 2006 no nível de: (a) 925 hPa e (b) 850 hPa. O intervalo de análise é 2 g/kg. ( <i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i> ).....	37
Figura 5.13 – Divergência horizontal do fluxo de umidade no nível de 925 hPa na Região Nordeste no dia 21 de abril de 2006 às: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de $4 \times 10^{-7} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a divergência (convergência) de umidade. ( <i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i> ).....	38
Figura 5.14 - Número de ocorrências dos acidentes mais relevantes relacionados com chuvas fortes no mês de junho de 2006 na cidade de Salvador. ( <i>Fonte dos dados: Departamento de Informação da Defesa Civil de Salvador</i> ).....	40
Figura 5.15 - Totais diários de precipitação (mm) do mês de junho de 2006 em quatro estações meteorológicas da cidade de Salvador. ( <i>Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ</i> ).....	41
Figura 5.16 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias do vento em superfície (m/s) registrado pela SRH- PCD de Salvador no mês de junho de 2006. ( <i>Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ</i> ).....	41
Figura 5.17 - Precipitação horária acumulada (mm) registrada pela SRH- PCD de Salvador no período de 11 UTC do dia 11 às 11 UTC do dia 12 de junho de 2006. ( <i>Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ</i> ).....	42
Figura 5.18 - Perfis verticais da temperatura potencial ( $\theta$ ), temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e temperatura potencial equivalente de saturação ( $\theta_{es}$ ) obtidos de sondagens de ar superior realizadas em Salvador (a,c) e Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 11 e (c,d) 12 de junho de 2006. ( <i>Fonte dos dados:</i>	

[www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html))..... 44

Figura 5.19 - Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s) obtidos de sondagens de ar superior realizadas na cidade de Salvador (a,c) e em Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 11 e (c,d) 12 de junho de 2006. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte). (*Fonte dos dados:* [www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html))..... 45

Figura 5.20 - Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 11 de junho de 2006 às 00 UTC (a), 12 UTC (b), 21 UTC (c), e dia 12 de junho às 00 UTC (d), 03 UTC (e), 06 UTC (f), 09 UTC (g) e 12 UTC (h). A localização aproximada de Salvador está indicada pela ponta da seta vermelha nas imagens. (*Fonte das imagens: Adaptado de* [www.sat.dundee.ac.uk](http://www.sat.dundee.ac.uk))..... 47

Figura 5.21 - Seção tempo-longitude da componente meridional do vento no nível de 500 hPa para o mês de junho de 2006 ao longo da latitude de 5°S. As áreas sombreadas assinalam componente de sul. (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 51

Figura 5. 22 - Pressão reduzida ao nível médio do mar às 00 UTC do dia 12 de junho de 2006. O intervalo de análise é de 2 hPa. (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 51

Figura 5.23 – Análise de linhas de corrente e intensidade do vento para as 00 UTC do dia 12 de junho de 2006 nos níveis de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. As velocidades do vento estão representadas por: cinza escuro para  $60 \text{ m/s} \leq V$  ( $30 \text{ m/s} \leq V$ ) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para  $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$  ( $20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500 e 850 hPa) e cinza claro para  $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$  ( $10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500, 850 e 925 hPa). (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 53

Figura 5.24 - Componente vertical da vorticidade relativa às 00 UTC do dia 12 de junho de 2006 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O

intervalo de análise é de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 54

Figura 5.25 - Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de  $12^\circ\text{S}$  no dia 12 de junho de 2006 no horário de: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de  $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 55

Figura 5.26 - Umidade específica às 00 UTC do dia 12 de junho de 2006 no nível de: (a) 925 hPa e (b) 850 hPa. O intervalo de análise é de 2 g/kg. (*Fonte dos dados: NCEP/NCA*)..... 56

Figura 5.27 - Divergência horizontal do fluxo de umidade no nível de 925 hPa na Região Nordeste no dia 12 de junho de 2006 às: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de  $4 \times 10^{-7} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a divergência (convergência) de umidade. (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)..... 57



**LISTA DE SIGLAS**

ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
CAPE	Convective Available Potential Energy
CODESAL	Defesa Civil de Salvador
CRA	Centro de Recursos Ambientais
19BC	19º Batalhão de Caçadores
DNMET	Departamento Nacional de Meteorologia
GOES-E	Geostationary Operational Environmental Satellite-East
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
INGÁ	Instituto de Gestão das Águas e Clima
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
METEOSAT	Meteorological Satellite
NCAR	National Centers for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PE	Pernambuco
RMS	Região Metropolitana de Salvador
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SEDEC	Secretaria Nacional de Defesa Civil
SRH	Superintendência de Recursos Hídricos
UTC	Universal Time Coordinated
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

**LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS**

$r_v$	Razão de mistura do vapor
$r_s$	Razão de mistura de saturação
$P$	Pressão atmosférica
$g$	Aceleração da gravidade
$q$	Umidade específica
$T_a$	Temperatura do ambiente
$T_p$	Temperatura da parcela
$T_{va}$	Temperatura virtual do ambiente
$T_{vp}$	Temperatura virtual da parcela
$T_k$	Temperatura absoluta
$T_{NCL}$	Temperatura no nível de condensação por levantamento
$\theta$	Temperatura potencial
$\theta_e$	Temperatura potencial equivalente
$\theta_{es}$	Temperatura potencial equivalente de saturação
$CAPE_{MÁX}$	Maximum Convective Available Potential Energy

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Na porção superficial da Terra, mais precisamente na litosfera e na atmosfera, ocorrem certos fenômenos que podem ser classificados como eventos naturais extremos. Estes podem estar associados à dinâmica interna ou externa da Terra. O primeiro caso envolve os terremotos, maremotos e vulcanismo. O segundo diz respeito aos fenômenos atmosféricos como ciclones tropicais, tornados, nevascas, geadas, ondas de calor ou de frio, chuvas torrenciais, etc. Quando esses fenômenos atingem áreas ocupadas, especialmente aglomerados urbanos, ocorrem acidentes, desastres e catástrofes que são definidos como impactos negativos ao sistema sócio-econômico (Dias & Herrmann, 2002).

Os desastres naturais que ocorrem com maior frequência são os decorrentes de eventos climáticos ou meteorológicos extremos que causam principalmente as nevascas, enchentes, secas, vendavais, enxurradas. Nos últimos anos há uma grande preocupação em relação ao aumento na frequência dos fenômenos naturais (os quais ocasionam desastres de caráter natural) em virtude do aquecimento global. No ano de 2006, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) divulgou um boletim anual alertando para as mudanças climáticas em andamento e o acirramento de desastres naturais (Quadro *et al.*, 2006).

Historicamente, os centros urbanos são notoriamente vulneráveis à variabilidade do clima e aos eventos extremos de precipitação. Historiadores e arqueólogos discutem que os desastres relacionados ao clima e às condições de tempo provocaram o desaparecimento de muitas cidades antigas. Tratando-se da influência de eventos extremos

urbanas, estas apresentam uma complexa vulnerabilidade que está relacionada com os danos causados a grandes populações em risco, à infra-estrutura (distribuição de energia e água, transportes e sistema de telecomunicações) e à atividade econômica em geral.

Foi necessário algum tempo para se perceber que por trás de todos (ou quase todos) os desastres naturais há o fator humano como um dos responsáveis pelos danos e tragédias que ocorrem nos desastres (a exemplo de construções em áreas de risco), quer seja como agente que intensifica ou provoca a ameaça, quer seja como elemento que se expõe vulneravelmente ao fenômeno adverso. Sendo assim, há uma interação entre as ameaças e as ações humanas (Guimarães *et al.*, 2008).

Nas grandes cidades os desastres naturais são agravados pela ocupação incorreta da população em áreas de risco. Alterações que ocorrem no microclima dos centros urbanos são devido à intensa atividade antrópica que, além de proporcionar grande volume de gases poluentes, também favorece a verticalização, a impermeabilização do solo e a diminuição de áreas verdes resultando em modificações na temperatura e na pluviometria de uma determinada região (Simões & Reis, 2006). O monitoramento das condições atmosféricas e do solo é de grande importância em eventos de precipitação intensa, podendo auxiliar a defesa civil das cidades nas tomadas de decisão que tem como objetivo evitar grandes prejuízos (Cavalcanti *et al.*, 2006).

A grande extensão territorial e as condições climáticas e físicas do Brasil o tornam sujeito a um número elevado de desastres naturais e situações de riscos constantes a sua população. Os desastres naturais mais comuns no Brasil são: inundações, estiagens, incêndios florestais, secas, vendavais, quedas de granizo e deslizamentos de terra (Secretaria Nacional de Defesa Civil-SEDEC, [www.defesacivil.gov.br](http://www.defesacivil.gov.br)). Como se pode observar, esses desastres estão intimamente relacionados com eventos extremos de chuva cujas conseqüências ocasionam altos custos econômicos, ambientais e sociais. Muitos

centros urbanos no Brasil sofrem inúmeros transtornos devido a ocorrência de chuvas fortes. Cidades como São Paulo, Belém, Fortaleza e Salvador são exemplos de centros urbanos que sofrem com eventos extremos de precipitação.

Apresentando áreas com encostas íngremes e baixadas, a cidade de Salvador, Bahia, enfrenta a cada chuva forte situações críticas que vitimam as comunidades mais carentes que habitam esses locais. Desastres naturais causados por chuvas fortes são marcas históricas da cidade que foi fundada no alto da escarpa debruçada sobre o mar e assentada ao longo da zona de influência de uma falha geológica. Os danos resultam da combinação entre altos índices pluviométricos, relevo acidentado e ocupação precária e desordenada do solo urbano. Uma explosiva associação de fatores de difícil solução em curto prazo (Defesa Civil de Salvador, 2005). Sendo assim, este estudo tem como objetivo analisar os sistemas meteorológicos que dão origem a chuvas fortes em Salvador dando ênfase aos seguintes aspectos:

- (a) Diagnosticar a evolução do cenário sinótico-dinâmico em superfície e em altitude.
- (b) Mostrar impactos ambientais ocasionados por eventos de precipitação extrema em Salvador.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERÍSTICAS DA CIDADE DE SALVADOR, BAHIA

Localizada no litoral leste da Região Nordeste, a cidade de Salvador ( $12^{\circ}55'S$ ,  $38^{\circ}31'W$ ), capital da Bahia, ocupa uma área de  $707 \text{ km}^2$  na qual vivem aproximadamente 2.892.625 pessoas (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas – IBGE, [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)). Apresenta clima quente e úmido e total anual de chuva de 2.098 mm (Departamento Nacional de Meteorologia-DNMET, 1992). Chuvas em Salvador ocorrem durante todo o ano. Entretanto, elas apresentam maior volume no período de abril a julho (Fig. 2.1). Na condição de metrópole, como a maioria das grandes cidades dos trópicos apresenta uma profunda dívida social, sendo necessário responder às demandas relacionadas com o crescimento urbano e, ao mesmo tempo, manter o equilíbrio ambiental mínimo necessário para a qualidade de vida de toda a população (Silva *et al.*, 2006).

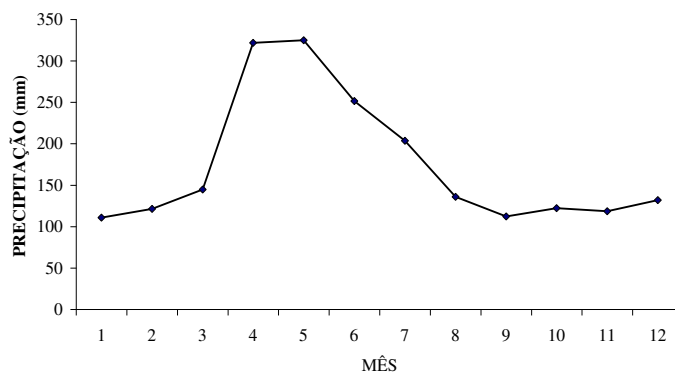


Figura 2.1. Normal climatológica da precipitação na cidade de Salvador-BA ( $12^{\circ}55'S$ ,  $38^{\circ}31'W$ ) no período 1961-1990 (Fonte dos dados: Departamento Nacional de Meteorologia, 1992).

## 2.1 - Hidrografia

A cidade apresenta uma rede cuja maioria dos rios tem nascentes longe da cidade. Os mais importantes são: (a) Rio Camurujipe, que nasce no município de Salvador, no bairro Boa Vista de São Caetano, percorre 14 km e deságua na praia da Costa Azul. Ele interliga o Parque do Abaeté à Avenida Magalhães Neto. Até a década de 70, era o responsável pelo abastecimento de água na cidade, mas atualmente é muito poluído; (b) Rio Jaguaribe, rio que nasce no bairro de Águas Claras, com o nome de rio Cascão, encontra-se com a represa de Ipitanga passando a se chamar Rio Trobogy até a Avenida Paralela, onde é denominado Rio Jaguaribe. Ele deságua na praia de Piatã em Salvador; (c) Rio Paraguari, nasce em Fazenda Coutos, em Salvador, e deságua na praia de Periperi; (d) Rio do Cobre, que nasce na Lagoa da Paixão, subúrbio de Coutos, Salvador, e faz parte do abastecimento de água da capital. Ele corta todo o Parque de São Bartolomeu, até desaguar na Enseada do Cabrito na Península de Itapagipe, orla sul de Salvador.

É importante ressaltar que os rios da cidade de Salvador vem sofrendo degradação ao longo dos anos, como é o caso do Rio Camurujipe. A atual situação de degradação do complexo hidrográfico da cidade de Salvador, além de ser um produto histórico-cultural, evidencia a ausência de um planejamento e de ações públicas voltadas para a manutenção dos seus recursos naturais, mesmo dentro de uma visão utilitária, onde o mínimo que se espera é o cuidado para que se possa explorar e usufruir desses bens por muitas gerações (Silva *et al.*, 2006).

## 2.2 - Vegetação

Salvador é uma cidade de vegetação bastante variada, que inclui desde as vegetações existentes em praias às das dunas. Todas sofrem o efeito contínuo dos ventos marinhos, carregados de sal, e da areia. A combinação vento, areia e água do mar confere à vegetação litorânea um aspecto particular, produzido por diversas formas de adaptação à água salgada, às altas temperaturas da areia, à escassez de água nas dunas, à forte ação do vento e da areia ([www.zone.com.br/destinoseaventuras/](http://www.zone.com.br/destinoseaventuras/)).

## 2.3 - Geologia e Relevo

A região metropolitana de Salvador (RMS) compreende cinco domínios geológicos diferentes, quais sejam: Alto Cristalino de Salvador, parte da bacia sedimentar do Recôncavo, Zona da Falha de Salvador, Baía de Todos os Santos e Planície Costeira Quaternária (Santos, 2003). A cidade divide-se em Cidade Baixa, uma estreita planície litorânea que se estende ao longo do mar e se alarga na altura da península de Itapagipe, e Cidade Alta, uma escarpa de 60 a 80 m de altura, que conduz à parte mais elevada do relevo, que na maior parte da cidade apresenta-se acidentado e cortado por vales profundos (<http://www.salvador2003.com.br/cidade.htm>).

A topografia predominante na cidade, acidentada nos morros que compõem a paisagem natural (tanto nas áreas em que se concentram comunidades de baixa como de alta renda) associada ao tipo de solo e ao elevado índice de ocupação das encostas com edificações construídas geralmente lado a lado (Fig. 2.2) aumentam sensivelmente a impermeabilização do solo local (Álvares Neto, 2006).



## 2.4 - Solo

Os solos de Salvador, em sua maioria, apresentam uma alta proporção de constituintes areno-agilosos. Tal característica, por si só, denota uma estabilidade estrutural, sendo que a desestruturação do fator estabilidade se dá principalmente pela ocupação indiscriminada.

O crescimento da expansão urbana ocasionou uma intensa transformação física em Salvador, devido às práticas inadequadas do uso do solo. Em conjunto com tal expansão se tem um fator de grande importância que é a época chuvosa na cidade. As chuvas fortes propiciam condições extremamente favoráveis ao escoamento superficial, pois reduzem significativamente a capacidade de infiltração de água no solo. Este processo de saturação do terreno, em associação com os tipos de solos da cidade (massapé na área do subúrbio ferroviário) e com a ocupação desordenada das encostas, é um aspecto de potencial muito grande para a ocorrência dos deslizamentos (Álvares Neto, 2006).

## 2.5 - Áreas de risco geológico

Desde sua fundação, a cidade de Salvador assumiu configuração urbanística ao longo das cumeadas, como forma de defesa contra ataques dos inimigos. Atualmente, um enorme contingente populacional ocupa as vertentes dos morros de forma irregular, formando assentamentos urbanos de baixa renda desprovidos de infra-estrutura básica e, muitas vezes, sem os serviços públicos necessários (Fig. 2.2). Essas ocupações irregulares das encostas da cidade traduzem-se num dos maiores problemas enfrentados pela administração municipal ao longo dos anos, tanto pela dificuldade de fiscalizar a formação desses assentamentos (através do controle da ocupação do solo urbano), como

pela manutenção das condições de risco oriundas da ausência de infra-estrutura e construções executadas sem critérios técnicos ([www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/](http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/)).

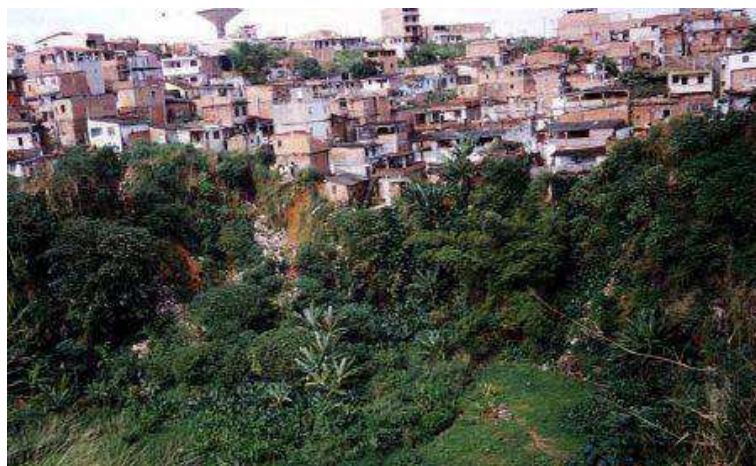


Figura 2.2 - Assentamentos urbanos de baixa renda desprovidos de infra-estrutura básica no Bairro do Tiradentes em Salvador-BA. (Fonte da foto: [www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/](http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/)).

## **CAPÍTULO 3**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Vários autores no Brasil e no mundo têm direcionado seus estudos para a compreensão e previsão dos eventos extremos de precipitação e sua capacidade de acarretar impactos na sociedade e economia de um determinado lugar ou região. As conclusões de alguns trabalhos relacionados com estudos de sistemas atmosféricos causadores de chuvas fortes são apresentadas a seguir.

Yamazaki & Orgaz (2004), utilizando um modelo numérico de mesoescala, analisaram eventos extremos de precipitação ocorridos em janeiro, outubro e novembro de 1963 em Portugal. Eles consideraram as precipitações diárias observadas nas cidades do Porto e Penhas Dourada, que apresentaram valores elevados de precipitação (superiores a 50 mm). O estudo mostra que esses eventos de chuvas fortes foram ocasionados pela interação entre a mesoescala e a escala sinótica.

Eventos intensos de precipitação na costa oeste da Índia foram estudados por Francis & Gadgil (2006). No estudo eles discutiram eventos ocorridos durante a monção de verão (junho-setembro) para o período entre 1951 e 1987, constatando que a probabilidade de ocorrência desses intensos eventos de chuva na costa oeste da Índia é maior de meados de junho a meados de agosto, sendo mais intensos no início de julho. Tais eventos (aproximadamente 62%) estão associados com sistemas organizados em grande e meso escalas, ligados diretamente a condições atmosféricas sobre o Oceano Índico Equatorial

ocasionando chuvas fortes que frequentemente excedem 150 mm por dia, e até mesmo 200 mm por dia, causando muitos danos à população local.

Num estudo enfocando um evento de chuva forte ocorrido em dezembro de 1999 na região norte da Venezuela, Lyon (2002) mostrou que mais de 210 mm foram observados entre os dias 2 e 4 de dezembro. No período de 2 dias (2 a 4 de dezembro), a capital do país, Caracas, recebeu mais de 150% da chuva anual. Este evento, que gerou inundações devastadoras e deslizamentos de terra na região norte da Venezuela, esteve associado com anomalias na circulação de grande escala.

Teixeira & Satyamurty (2006) analisaram as características dinâmicas e sinóticas de episódios de chuvas fortes na Região Sudeste do Brasil para o período 1991-2001. No estudo, os episódios de chuvas fortes são definidos como aqueles em que a isoietas de 50 mm/dia delimita uma área igual ou maior do que 10.000 km<sup>2</sup> no Sudeste. As correlações significativas mostraram que as anomalias de algumas variáveis atmosféricas podem ser vistas como precursores de precipitação forte no Sudeste e devem ser melhor estudadas para melhorar a previsão do tempo na região.

Moscati & Gan (2004) investigaram a atuação simultânea de vários sistemas meteorológicos que no período de 16 a 26 de dezembro de 1989 foram responsáveis pela precipitação intensa e persistente registrada sobre a região semiárida do Nordeste. O estudo mostrou que a entrada de um sistema frontal organizou a convecção tropical sobre o continente, formando a Zona de Convergência do Atlântico Sul, com orientação noroeste-sudeste. Tanto a entrada desse sistema frontal em superfície como a incursão de cavados de ondas curtas no nível de 200 hPa sobre o sul do Brasil, intensificaram uma crista localizada a leste (associada à Alta da Bolívia) e colaboraram para a formação de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis sobre o Atlântico Sul, próximo à costa do Nordeste.

Segundo Alves *et al.* (2001), a formação e desenvolvimento de um sistema convectivo de mesoescala (SCM) no período de 20 a 21 de maio de 1999 no setor leste do Nordeste esteve dinamicamente associado à instabilidade decorrente da presença de uma frente fria estacionária no centro-sul da Bahia e à presença de uma onda curta que se deslocou de leste para oeste abaixo do equador, atingindo a costa leste do Nordeste brasileiro, evoluindo para um ciclone fechado em 700 hPa quando da maturação do SCM. Tal evento ocasionou fortes chuvas nas áreas em que atuou.

Analisando o mês de janeiro de 2004, Alves *et al.* (2006) detectaram a interação de quatro sistemas atmosféricos no Nordeste brasileiro: a Zona de Convergência Intertropical, um Vórtice Ciclônico de Ar Superior, uma Frente Fria posicionada no centro-sul da região e a Oscilação de Madden-Julian. Essa interação associou-se ao estabelecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul ao norte de sua posição climatológica, potencializando a persistência de chuvas intensas no centro-norte da região.

Com o objetivo de avaliar a natureza de sistemas convectivos intensos detectados na região de alcance do radar de Petrolina-PE, Barbosa & Correia (2005) analisaram casos extremos de precipitação que provocaram inundações em algumas localidades do Nordeste no início de 1985 (12 de abril) e um episódio de chuva forte registrado no dia 05 de junho do mesmo ano. As autoras concluíram que o desenvolvimento dos sistemas precipitantes no dia 12 de abril esteve associado com cisalhamento vertical do vento que contribuiu para a formação de correntes ascendentes e descendentes. Os sistemas precipitantes profundos observados no dia 5 de junho tiveram origem num sistema frontal que atingiu o sul do Nordeste e modificou substancialmente as condições dinâmicas e termodinâmicas da região.

Estudos relacionados com a ocorrência de eventos extremos de precipitação e seus impactos em centros urbanos ainda são escassos na literatura. Alguns estudos

abordando esse assunto para algumas cidades do Brasil e do mundo são apresentados a seguir.

A grande maioria das cidades desenvolveu-se com uma ocupação urbana intensa e desordenada. Nesses casos a infra-estrutura de drenagem é totalmente inadequada e ineficaz (em alguns casos, inexistente). Conseqüentemente, em determinados centros urbanos, evento de chuva maior do que 50 mm, em 24 horas, é suficiente para provocar enchentes, transbordar rios, entupir esgotos e canais, provocando o alagamento das casas construídas inadequadamente (Souza *et al.*, 1998). Um exemplo disso está no estudo de Goswami & Ramesh (2008) que enfoca eventos extremos de precipitação e analisa a vulnerabilidade do sistema de observação de desastres em áreas urbanas na Índia. O estudo mostra que o episódio de chuva forte que ocorreu nos dias 26 e 27 de julho de 2005 na cidade de Mumbai na Índia, causou grandes prejuízos econômicos e a perda de mais de 1500 vidas.

Kamal (2004), analisando o problema das enchentes na região de Lai Nulla no Paquistão, detectou um total de 19 grandes inundações provocadas por eventos extremos de precipitação no período de 59 anos entre 1944 e 2002. Nesses episódios as cidades de Islamabad e Rawalpindi, localizadas na região, sofreram grandes danos. Dentro do período estudado, uma das inundações consideradas mais fortes ocorreu no ano de 2001, deixando um saldo de 74 vidas humanas perdidas e um prejuízo de bilhões de dólares.

Ferreira *et al.* (2008) analisaram os impactos de eventos extremos de precipitação sobre a população da cidade de Manaus nos anos de 2005, 2006 e 2007. Utilizando registros de acidentes fornecidos pela Defesa Civil de Manaus, os autores mostram que as chuvas fortes foram provocadas pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul e associação de sistemas frontais com linhas de instabilidade que se deslocaram para o interior do continente atingindo a região de Manaus.

Tendo em vista estudos que relacionam eventos de chuvas fortes com centros urbanos, é importante ressaltar que não somente a ocorrência de tais eventos influencia as cidades, mas também que o efeito contrário ocorre, ou seja, as cidades podem contribuir para mudanças no regime de chuva local. Diem (2008), trabalhando com este tipo de abordagem, estudou os possíveis efeitos urbanos na frequência de chuvas fortes na região metropolitana de Atlanta para um período climatológico entre 1949 e 2005. O autor detectou um aumento na frequência dos dias de chuva no noroeste de Atlanta e observou que a frequência de dias com chuvas fortes esteve no mínimo 20% maior do que a frequência prevista para o período climatológico.

Algumas áreas urbanas do Nordeste também sofrem com a ocorrência de eventos de chuvas fortes que causam sérios problemas para a região. Muitas atividades econômicas do Nordeste são duramente afetadas pela distribuição e irregularidade da precipitação, que são decorrentes de uma série de fatores (Paiva Neto, 2003). É sabido que o Nordeste é uma região caracterizada por alta variabilidade espacial e temporal na distribuição da chuva. Na costa leste chove 2000 mm ou mais anualmente, enquanto nas áreas do interior chove, em média, 400 mm (Kousky, 1979).

No estudo feito por Souza *et al.* (1998) foi analisado um complexo convectivo de mesoescala formado no dia 24 de abril de 1997 que provocou chuva intensa sobre a região da faixa litorânea norte do Nordeste do Brasil, incluindo a cidade de Fortaleza-CE. Este sistema meteorológico de mesoescala, que englobou uma área horizontal maior do que 200.000 km<sup>2</sup>, apresentou forma perfeitamente circular, temperatura no topo em torno de -75°C e ciclo de vida de aproximadamente 8 horas. Um total de 270 mm de chuva (correspondendo a 79% da climatologia mensal do mês) foi observado num período ininterrupto de 13 horas. Essa precipitação intensa ocasionou enormes transtornos e prejuízos à população da cidade de Fortaleza.

A cidade do Salvador é uma das capitais nordestinas com maior potencial para a ocorrência de desastres naturais relacionados com eventos intensos de chuva (Silva Aragão *et al.*, 2006). A determinação de eventos extremos em Salvador foi realizada por Barreto *et al.* (2008) tendo por base a técnica do percentil aplicada a uma série de totais diários de chuva do período 1964-2007. Foram considerados eventos extremos aqueles com valor igual ou maior do que o percentil  $P_{97} = 50$  mm. As autoras constataram que o maior número de eventos intensos é observado dentro do quadrimestre chuvoso da cidade totalizando 235 eventos intensos de precipitação dos quais 128 (55%) ocorreram nos meses de abril (49), maio (47) e junho (32). Esses valores são praticamente o triplo do número de eventos intensos observados nos outros meses. O máximo de cinco eventos é visto em maio de 1969, abril de 1975, abril de 1996 e abril de 2006.

Tendo como foco o ano de 2006, Santos *et al.* (2008) analisaram chuvas intensas ocorridas na cidade de Salvador-BA no dia 12 de novembro. Os transtornos pelos quais a cidade passou foram inúmeros, tais como alagamentos e deslizamentos de terra. O evento chuvoso foi causado pela convecção profunda organizada na forma de aglomerados convectivos formados em associação à penetração de um sistema frontal que se manteve semi-estacionário sobre a Bahia, contribuindo para dar início a um episódio da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Totais diários de chuva acima de 70 mm foram registrados em quatro estações meteorológicas da cidade na manhã do dia 13. As chuvas mais intensas ocorreram na madrugada desse dia; uma das estações registrou 70 mm de chuva em apenas 6 horas. O processo de urbanização e suas conseqüências está intimamente ligado com o tempo e clima do lugar. A ocorrência de eventos meteorológicos extremos pode interferir de forma negativa no modo de vida da população de uma cidade através de desastres naturais. Portanto, torna-se cada vez mais importante a realização de estudos focados neste assunto tendo em vista a prevenção de desastres em áreas urbanas.



## CAPÍTULO 4

### DADOS E METODOLOGIA

#### 4.1 - Dados

Neste estudo são analisadas as características de sistemas meteorológicos que dão origem as chuvas fortes em Salvador. Os dados analisados neste trabalho são:

- a) Reanálises dos National Centers for Environmental Prediction (NCEP) nos níveis isobáricos padrões, com espaçamento de grade de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , para os horários das 00, 06, 12 e 18 UTC para dias dos meses de abril e junho de 2006. As seguintes variáveis meteorológicas são utilizadas: componente zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s), umidade específica (g/kg), movimento vertical (hPa/s); pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa).
  
- b) Totais pluviométricos diários observados em estações meteorológicas da cidade de Salvador. A Figura 4.1 ilustra a localização de oito estações meteorológicas de superfície na cidade.



Figura 4.1 - Localização de oito estações meteorológicas de superfície na cidade de Salvador-BA. As estações estão indicadas por um ponto preto no mapa: INMET, 19BC, CRA, Aterro Canabrava, SRH-PCD, Aterro Centro, São Bartolomeu e Base Naval. (Fonte do mapa: [www.defesacivil.salvador.ba.gov.br](http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br)).

- c) Dados horários de vento e chuva acumulada registrados pela estação automática do Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ), antiga Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia (SRH);
- d) Sondagens de ar superior realizadas às 12 UTC na estação de altitude de Salvador (13°S, 38°W, 51 m) e Caravelas (17°S, 39°W, 3 m), localizada no sul da Bahia;
- e) Imagens dos satélites meteorológicos METEOSAT e GOES-E nos canais infravermelho térmico e visível num total de oito em vinte e quatro horas, correspondentes às horas inteiras múltiplas de três horas.
- f) Informações da Defesa Civil da cidade de Salvador.

## 4.2 – Metodologia

O período de outono/inverno de 2006 na cidade de Salvador foi caracterizado por um índice pluviométrico acima do normal esperado. O volume registrado nesse período superou em 33% a média histórica dos últimos 30 anos e, em virtude dos inúmeros acidentes, no dia 13 de junho foi declarada situação de emergência (reconhecimento legal pelo poder público de situação anormal, provocada por desastres em uma determinada localidade) no Município objetivando agilizar os procedimentos para atendimento à população pela Defesa Civil em conjunto com outros órgãos municipais. Segundo a Defesa Civil, além dos índices pluviométricos terem sido elevados nesse período, as concentrações de grande volume de chuva em curtos períodos de tempo foram fatores que influenciaram diretamente na saturação do solo, aumentando significativamente o número de registros de alagamentos de áreas e deslizamentos de terra. Contudo, a maioria das vistorias realizadas pela Defesa Civil foi relacionada com deslizamentos de terra que corresponderam a 53% do total registrado de vistorias, concentrando-se nas regiões onde estão localizadas as áreas de risco geológico do Município (Defesa Civil de Salvador, 2006).

A escolha dos eventos a serem analisados foi baseada na quantidade (e intensidade) da precipitação observada e nos prejuízos causados pelas chuvas na cidade de Salvador. Foram selecionados eventos nos quais os totais pluviométricos diários atingiram valores superiores a 50 mm. Assim, os eventos dos dias 21 de abril e 12 de junho foram escolhidos para análise.

O diagnóstico da circulação atmosférica foi realizado com base nos campos da pressão ao nível médio do mar, intensidade e magnitude do vento, vorticidade relativa, umidade específica, divergência horizontal do fluxo de umidade e movimento vertical nos

níveis de 1000 a 200 hPa. As imagens de satélites possibilitaram acompanhar visualmente o desenvolvimento dos sistemas meteorológicos sobre a área de estudo. Os dados horários de superfície foram usados para analisar a variabilidade do vento e da precipitação. As radiossondagens serviram de base para diagnosticar a estrutura termodinâmica e do vento na vertical de Salvador e Caravelas. Foi utilizada a CAPE, Energia Potencial Convectiva Disponível, para avaliar o grau de atividade convectiva em Salvador. No presente trabalho, a obtenção deste parâmetro é baseada na metodologia de Correia (1989) e foi denominado de Energia Potencial Convectiva Disponível Máxima ( $CAPE_{MÁX}$ ). A necessidade de obter o valor máximo da CAPE surgiu em função do horário da sondagem, realizada às 12 UTC, enquanto que a atividade convectiva normalmente aumenta no decorrer do dia em áreas costeiras tropicais. A partir da temperatura mais elevada do dia, foi encontrado o valor correspondente da temperatura do bulbo úmido através de diagrama termodinâmico para em seguida encontrar-se a temperatura da parcela. Em seguida, a  $CAPE_{MÁX}$  foi determinada com base na seguinte equação:

$$CAPE_{MÁX} = g \int_{NCL}^{NE} \frac{T_{vp} - T_{va}}{T_{va}} \quad (4.1)$$

na qual:

$g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$T_{va} = (T_a + 0,61q)$  é a temperatura virtual do ambiente ( $^{\circ}C$ )

$T_{vp} = (T_p + 0,61q)$  é a temperatura virtual da parcela ( $^{\circ}C$ )

$T_a$  é a temperatura do ambiente ( $^{\circ}C$ )

$q$  é a umidade específica ( $g/kg$ )

$T_p$  é a temperatura da parcela obtida através do diagrama termodinâmico com base no valor mais alto da temperatura do bulbo úmido ( $T_w$ ), determinado com base nos dados horários de superfície da PCD do Instituto de Gestão das Águas e Clima.

NE é o nível de equilíbrio (nível no qual  $T_a = T_p$ ).

NCL é o nível de convecção por levantamento.

Valores que caracterizam a CAPE e condições de tempo associadas são apresentados na tabela a seguir.

Valores da CAPE (J/kg)	Condições de tempo esperadas
$500 \leq \text{CAPE} < 1000$	Convecção fraca
$100 \leq \text{CAPE} < 2500$	Convecção moderada
$\text{CAPE} \geq 2500$	Convecção forte

Tabela 1. Classificação da CAPE ( *Fonte da tabela: Bluestein, 1993*).

As temperatura potencial ( $\theta$ ), temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e temperatura potencial equivalente de saturação ( $\theta_{es}$ ) foram calculadas segundo as equações propostas por Bolton (1980) e possibilitaram avaliar as condições termodinâmicas e o grau de estabilidade da atmosfera no período de estudo. O cálculo das temperaturas potenciais foi feito com base nas seguintes equações:

$$\theta = T_k (1000/P)^{0,286} \quad (4.2)$$

$$\theta_e = \theta \exp (2,64r_v/T_{NCL}) \quad (4.3)$$

$$\theta_{es} = \theta \exp (2,64r_s/T_k) \quad (4.4)$$

na qual:

$T_k$  = temperatura absoluta (Kelvin)

$P$  = pressão atmosférica (hPa)

$r_v$  = razão de mistura do vapor (g/kg)

$T_{NCL}$  = Temperatura no Nível de Condensação por levantamento

$r_s$  = razão de mistura de saturação (g/kg)

Na elaboração de mapas e gráficos com os dados do NCEP foi utilizado o GrADS, um sistema de Visualização e Análise de Dados em Pontos de Grade. É um software interativo utilizado nas tarefas de acesso, manipulação e visualização de dados geofísicos em geral. O GrADS trabalha com matrizes de dados nos formatos BINÁRIO, GRIB, NetCDF ou HDF-SDS, nas quais as variáveis podem ter até 4 dimensões (longitude, latitude, níveis verticais e tempo). Atualmente, o GrADS é o software mais utilizado nos centros operacionais e de pesquisa meteorológica.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os altos índices pluviométricos registrados em Salvador no período do outono/inverno, aliados às características geomorfológicas de ocupação desordenada do solo, geram anualmente um cenário de risco que atinge principalmente a população carente moradora das áreas mais vulneráveis a acidentes na cidade. As fortes chuvas, características dessa época, costumam atingir estas áreas gerando muitas vezes desastres com registros de vítimas e desabrigados. Conforme levantamento do Censo IBGE/2000 existem 350.000 residências (metade do total da cidade) consideradas precárias, e o Plano Descritor de Encostas/2004, indica 1.007 pontos de riscos de escorregamento de terra (Defesa Civil de Salvador, 2006).

Durante o período das chuvas fortes em Salvador, as ações preventivas desenvolvidas pela Defesa Civil com apoio de órgãos parceiros são fundamentais para a diminuição dos danos ocasionados pelas chuvas. Através de um trabalho educativo coordenado, várias ações são realizadas com o objetivo de sensibilizar a comunidade para, em conjunto, alterar o cenário de vulnerabilidade da cidade. No entanto, é importante salientar que, se não houver uma política contínua de habitação popular e requalificação de áreas degradadas, ainda haverá por muito tempo, no outono/inverno, uma cidade com sérios problemas durante as chuvas.

## 5.1 – Abril de 2006

De acordo com a Defesa Civil de Salvador, o maior índice pluviométrico do ano de 2006 foi registrado no mês de abril, quando choveu 110,6 mm em um único dia (21), sendo esse o maior volume de chuva alcançado por uma capital do país naquela data. Barreto *et al.* (2008) identificaram cinco eventos de chuva forte nesse mês em 2006. Um total de 6.050 solicitações de ajuda foi registrado pela Defesa Civil no quadrimestre chuvoso; 44% ocorreu em abril, sendo a maior parte das solicitações relacionadas com deslizamentos de terra, desabamento de imóveis e alagamentos (Fig. 5.1).

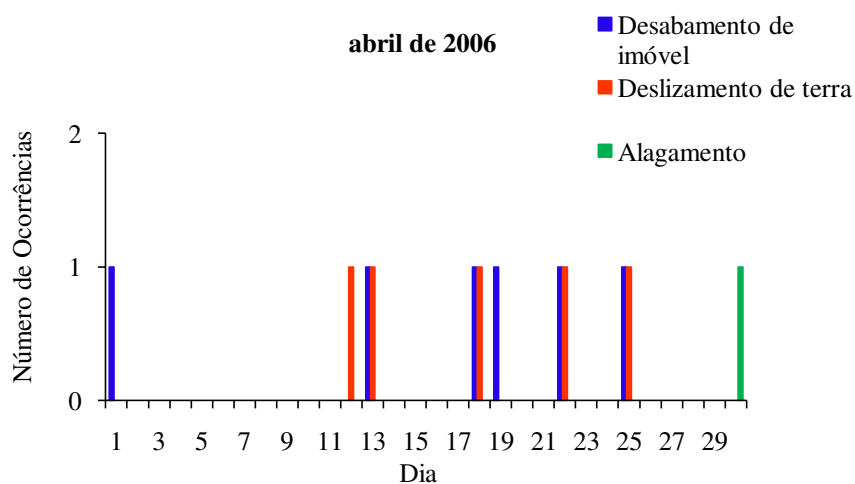


Figura 5.1 – Número de ocorrências mais relevantes relacionadas com chuvas fortes no mês de abril de 2006 na cidade de Salvador. (Fonte dos dados: Departamento de Informação da Defesa Civil de Salvador).

No mês de abril de 2006 as chuvas se fizeram presentes em Salvador em praticamente todo o período, totalizando 587,4 mm na estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); somente os dias 5, 12, 13 e 14 não apresentaram totais diários de chuva (Fig. 5.2). No dia 7 ocorreram chuvas com intensidade moderada a forte. No dia 29 também ocorreu um evento de chuva forte com registros elevados em todas as estações. As



chuvas mais intensas concentraram-se entre os dias 19 e 26 de abril. Entretanto, foi no dia 21 que elas estiveram mais intensas, totalizando 110,6 mm na estação do INMET. Como dito anteriormente e ilustrado através do gráfico, a estação do INMET registrou nesse dia o valor de 110,6 mm de chuva, o que representa 34 % da normal climatológica que é de 326,2 mm. A variação diária do vento em superfície ilustrada na Figura 5.3 mostra que o vento esteve fraco nesse mês, mas com intensidade relativamente forte nos dias 10 e 11, dentro do quadrante nordeste, atingindo valores de até 2,5 m/s. Ventos do quadrante nordeste predominaram do dia 2 ao dia 12 de abril. Nos dias 20 e 21, o vento esteve fraco e no quadrante sudoeste, o que sugere a penetração de um sistema frontal.

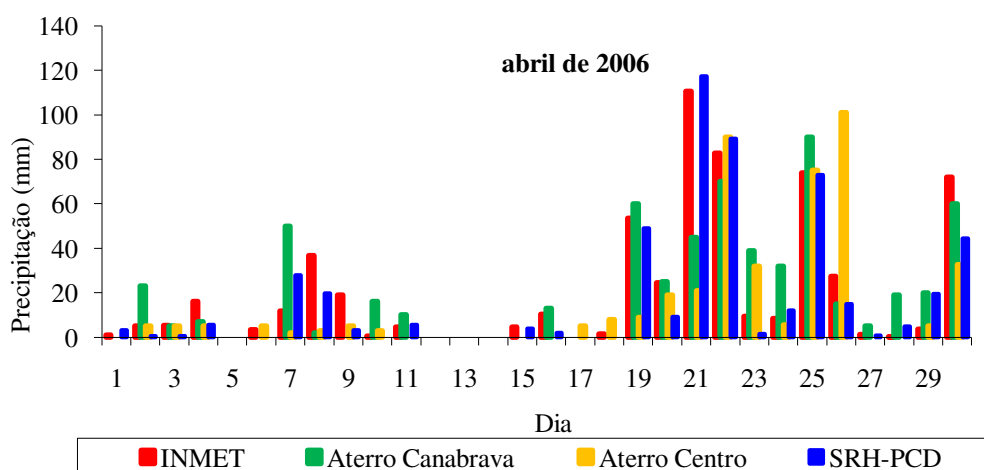


Figura 5.2 - Totais diários de precipitação (mm) do mês de abril de 2006 em quatro estações meteorológicas da cidade de Salvador. (*Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ*).

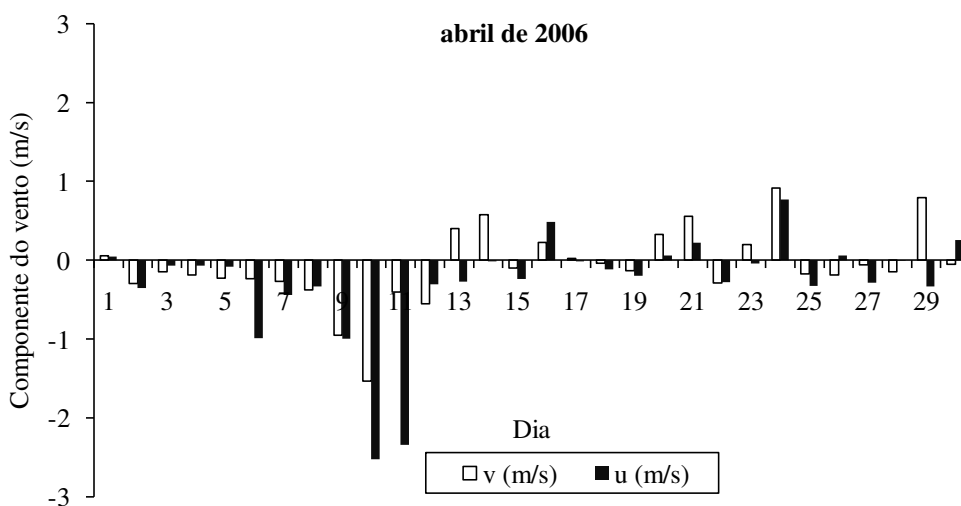


Figura 5.3 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias do vento em superfície (m/s) registrado pela SRH-PCD de Salvador no mês de abril de 2006. (*Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ*).

A chuva forte começou no dia 21 às 08 UTC, aumentando gradualmente de intensidade nos horários anteriores de acordo com o gráfico da precipitação acumulada (Fig. 5.4). Um total de 55 mm precipitou entre as 08 e 10 UTC, quando a chuva cessou temporariamente. Às 03 UTC do dia 22 voltou a chover. A chuva cessou às 5 UTC mas retornou às 09 UTC, para voltar a parar às 11 UTC. É importante ressaltar que as análises deste evento foram focadas no dia 21, quando houve chuva intensa contínua.

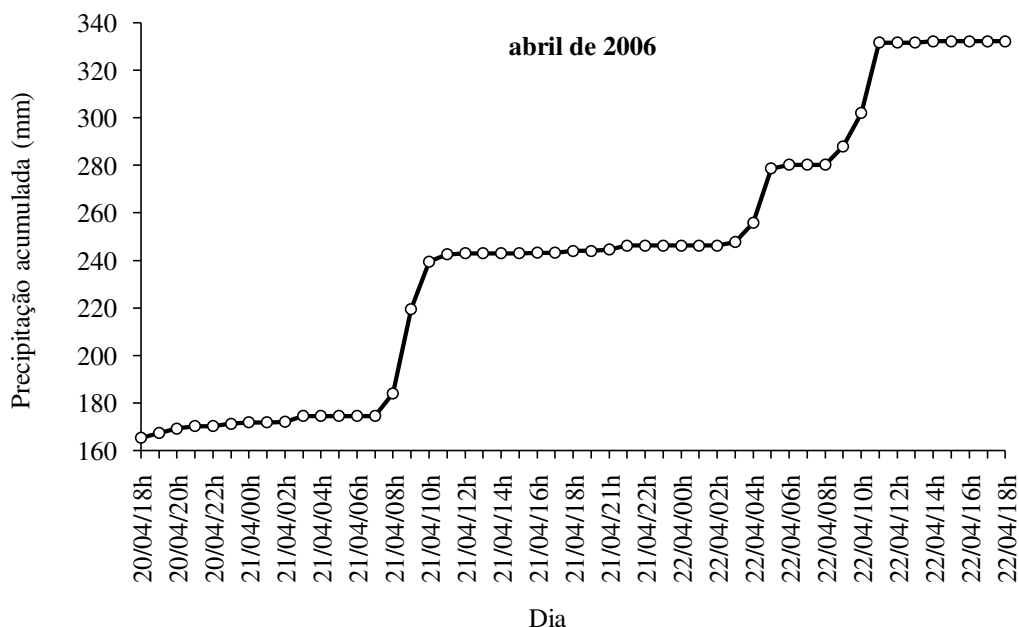


Figura 5.4 - Precipitação horária acumulada (mm) registrada pela SRH-PCD de Salvador no período de 18 UTC do dia 20 às 18 UTC do dia 22 de abril de 2006. (*Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ*).

Com o objetivo de diagnosticar a estrutura termodinâmica da atmosfera na cidade de Salvador no dia anterior e no dia do evento chuvoso, os perfis verticais da temperatura potencial ( $\theta$ ), temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e temperatura potencial equivalente de saturação ( $\theta_{es}$ ) para as 12 UTC dos dias 20 (dia anterior ao evento) e 21 de abril são mostrados na Figura 5.5. Perfis verticais obtidos das sondagens realizadas na cidade de Caravelas, sul da Bahia, também são mostrados na figura com o objetivo de detectar uma possível influência frontal na Bahia. Kousky (1979), usando dados de superfície, também utilizou a cidade de Caravelas para detectar a penetração de frentes na Região Nordeste.

No dia 20 já se nota, através da proximidade entre as curvas de  $\theta_e$  e  $\theta_{es}$ , que a atmosfera encontra-se com umidade até altos níveis (características de atuação de sistema frontal) e condicionalmente instável em função da diminuição de  $\theta_{es}$  com a altura até em torno de 900 hPa em Salvador (Fig. 5a) e 850 hPa em Caravelas (Fig. 5.5b). As curvas

para Caravelas também estão próximas, caracterizando alto teor de umidade na atmosfera dessa localidade (Fig. 5.5b). No dia 21, a atmosfera de Salvador mantém o teor de umidade, porém não apresenta características de uma atmosfera condicionalmente instável como observado no dia anterior (Fig. 5.5c). O valor da  $CAPE_{MÁX}$  no dia 20 de abril foi de 1680 J/kg e de 1335 J/kg no dia 21, o que mostra que no dia anterior ao evento houve condições mais propícias ao desenvolvimento da atividade convectiva. É interessante notar a camada de mistura em Caravelas nos dias 20 e 21 evidenciada pelo valor constante de  $\theta$  na camada abaixo de 900 hPa. Os perfis verticais das componentes zonal e meridional do vento observado em Salvador e Caravelas estão representados na Figura 5.6. No dia 20 em Caravelas (Fig. 5.6b) o vento alterna entre os quadrantes sudeste, próximo à superfície, e sudoeste entre 900 e 800 hPa, apresentando intensidade de até 35 m/s nos altos níveis. Na sondagem de Salvador (Fig. 5.6a) o vento é do quadrante nordeste (até próximo de 900 hPa) e sudoeste (entre 900 e 700 hPa), com intensidade fraca. No dia 21 em Caravelas o vento é de sudoeste até o nível de 925 hPa; acima desse nível há variação na direção e intensidade até os altos níveis, onde chega a atingir velocidades de até 25 m/s (Fig. 5.6d). Salvador tem ventos fracos de nordeste até em torno de 700 hPa; acima desse nível há grande variação na direção (Fig. 5.6c).

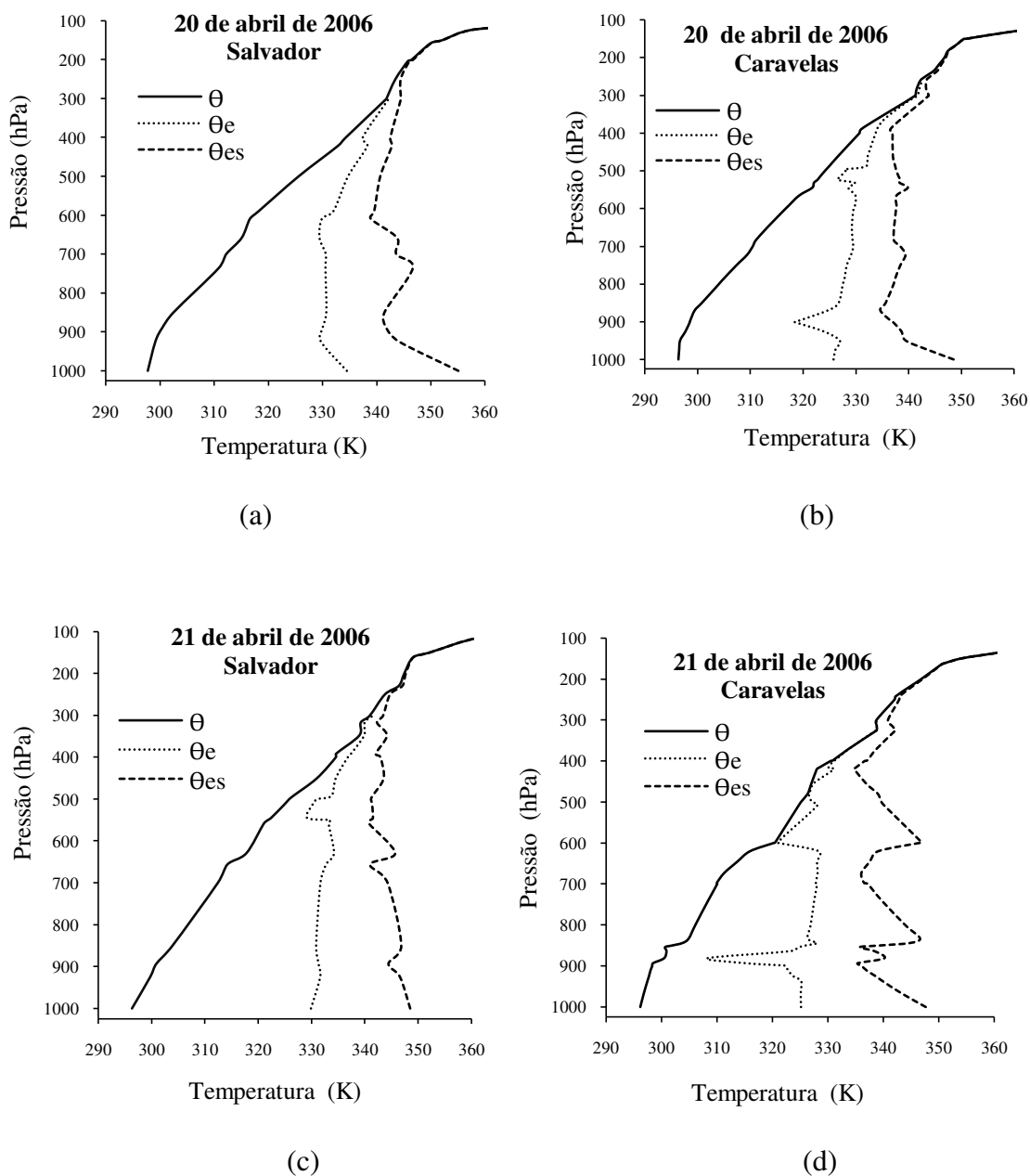


Figura 5.5 - Perfis verticais da temperatura potencial ( $\theta$ ), temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e temperatura potencial equivalente de saturação ( $\theta_{es}$ ) obtidos de sondagens de ar superior realizadas em Salvador (a,c) e Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 20 e (c,d) 21 de abril de 2006. (Fonte dos dados: [www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)).

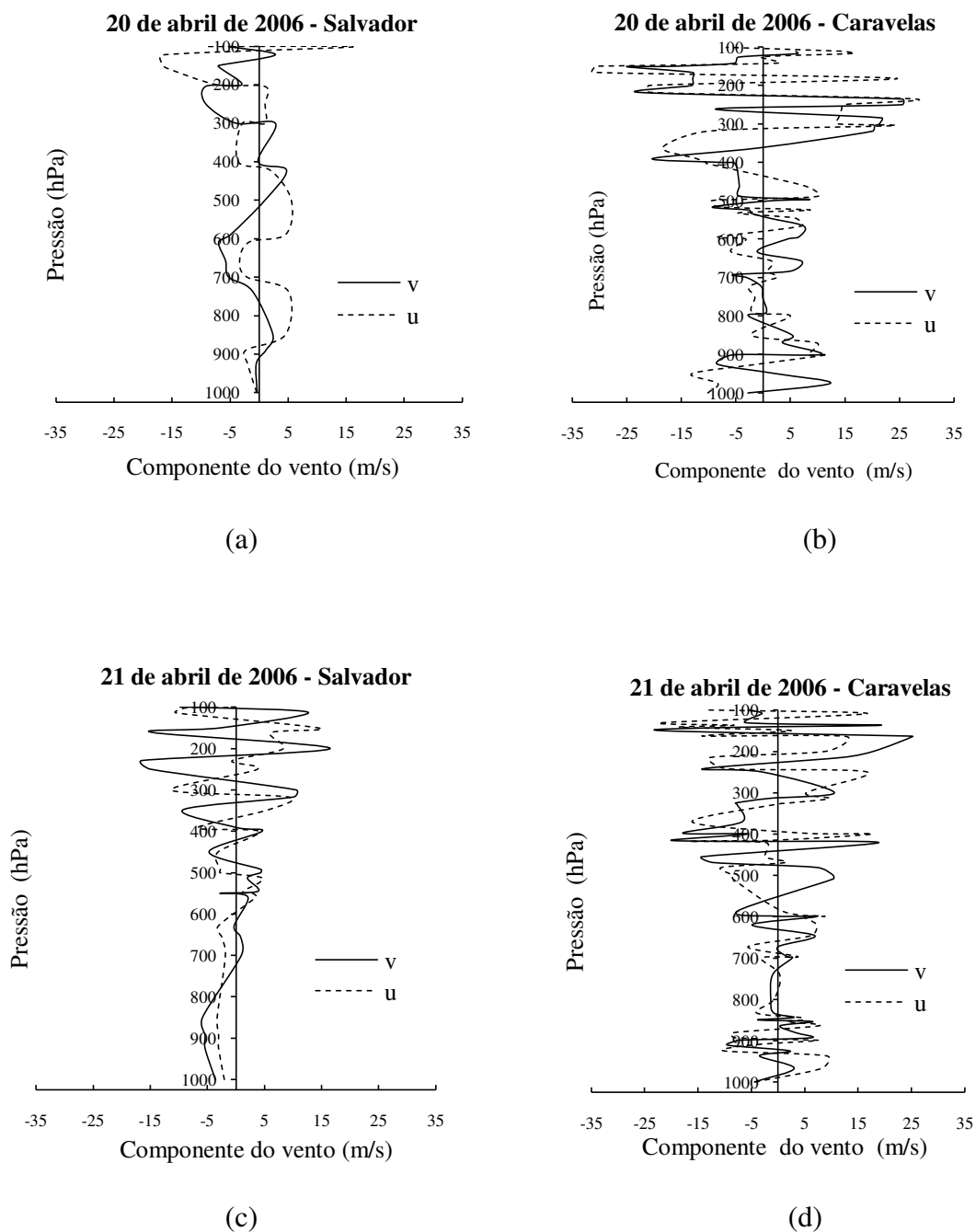
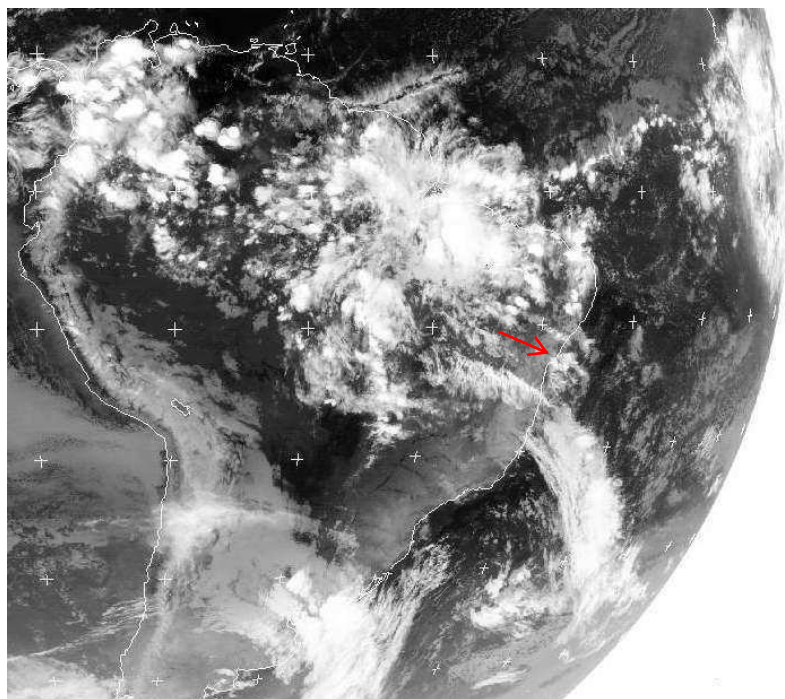
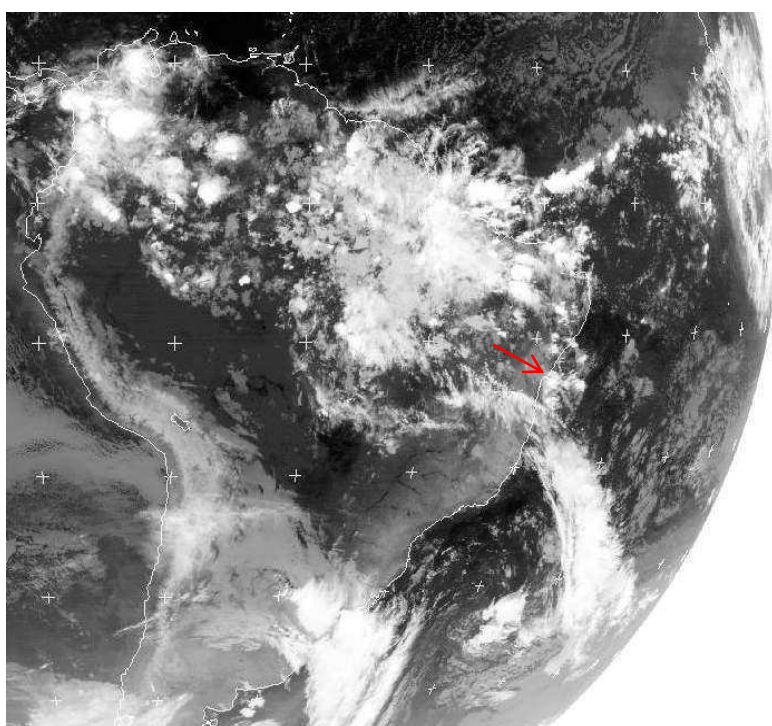


Figura 5.6 - Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s) obtidos de sondagens de ar superior realizadas na cidade de Salvador (a,c) e Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 20 e (c,d) 21 de abril de 2006. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte). (Fonte dos dados: [www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)).

As imagens do satélite meteorológico GOES-E obtidas em intervalos de 3 horas apresentadas na Figura 5.7 permitem acompanhar a evolução do sistema que provocou a chuva forte na madrugada do dia 21 de abril. Nas imagens de 00 e 03 UTC (Fig. 5.7a,b) observa-se bastante nebulosidade na área norte e central do Brasil com vários aglomerados de nuvens isolados. A faixa de nebulosidade associada com a Zona de Convergência Intertropical pode ser observada na região equatorial. É evidente uma banda de nebulosidade com orientação noroeste-sudeste que se estende sobre o sul do Nordeste e o sudoeste do Atlântico Sul associada a um sistema frontal austral. A análise de imagens de satélite (não mostradas) indica que esse sistema frontal atingiu o sul do Brasil no dia 15, avançando no sentido sudoeste-nordeste sobre o território brasileiro. Áreas de convecção profunda podem ser vistas no norte do Nordeste, notadamente às 03, 09 e 12 UTC, na faixa costeira de Sergipe e Bahia (Fig. 5.7b-d). A Figura 5.7 ainda documenta outra banda de nebulosidade frontal vista sobre o Uruguai e Rio Grande do Sul.



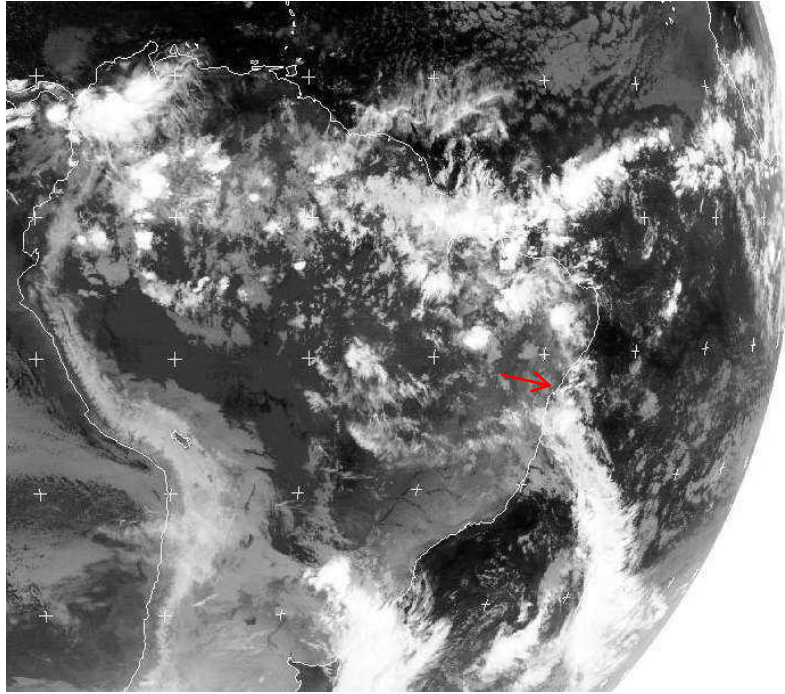
(a)



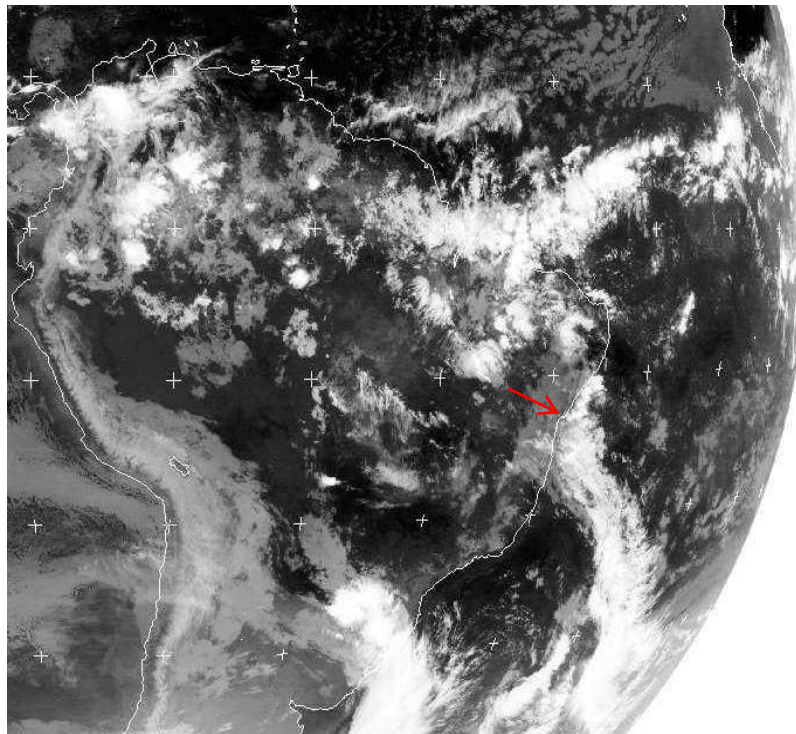
(b)

Figura 5.7 - Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 21 de abril de 2006 às: (a) 00 UTC; (b) 03 UTC; (c) 09 UTC e (d) 12 UTC. A localização aproximada de Salvador está indicada pela ponta da seta vermelha nas imagens. (Fonte das imagens: Adaptado de [www.sat.dundee.ac.uk](http://www.sat.dundee.ac.uk)).





(c)



(d)

Figura 5.7 - Conclusão

No campo da pressão atmosférica ao nível médio do mar às 00 UTC do dia 21 de abril (Fig. 5.8) é evidente a presença de um cavado a leste da Bahia e Região Sudeste, na área da banda de nebulosidade frontal vista na Figura 5.7a. Também é possível observar a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), com centro em torno de (43°S, 23°W), e a baixa frontal no sudoeste do Atlântico Sul.

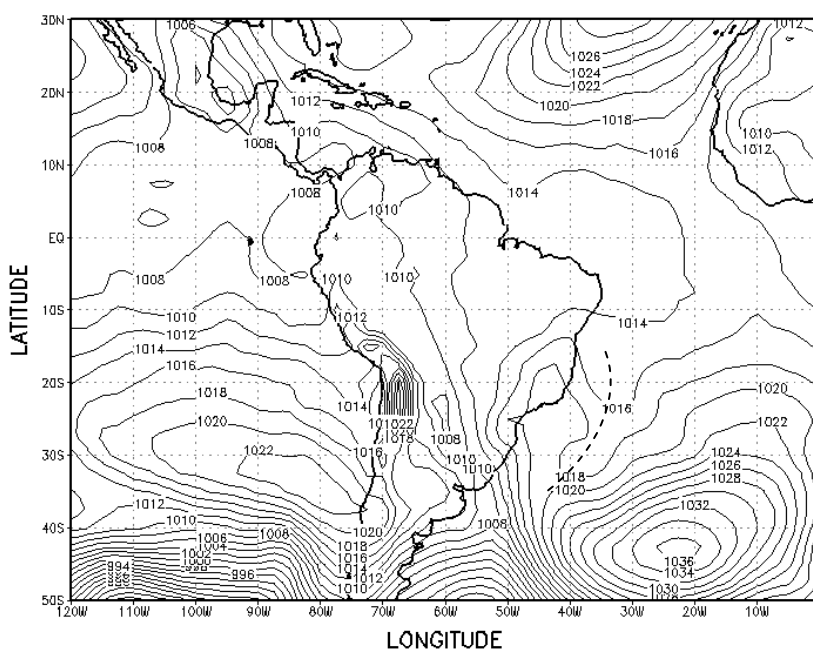


Figura 5.8 - Pressão reduzida ao nível médio do mar às 00 UTC do dia 21 de abril de 2006. O intervalo de análise é de 2 hPa. A linha tracejada assinala um eixo de cavado. (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*).

No campo do vento na baixa troposfera (Fig. 5.9a,b) pode-se comprovar as observações feitas acima com a presença de um cavado no escoamento de leste, a leste da Bahia, com considerável amplitude no nível de 925 hPa. Nesses níveis o ciclone frontal também está evidente, centrado em torno de (30°S, 40°W). Um centro anticiclônico é visto a noroeste do ciclone. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está bem definida em 925 hPa através da confluência dos ventos próximo ao equador. O anticiclone subtropical

do Atlântico Sul (ASAS) também pode ser notado no campo do vento nos baixos níveis. No nível de 500 hPa (Fig. 5.9c) existe um centro anticiclônico a leste do Nordeste, que não é visível em 200 hPa (Fig. 5.9d), nível que também apresenta circulação anticiclônica nessa área. Na região de latitudes médias os sistemas atmosféricos estão bem configurados nesses níveis. Um centro de vorticidade anticiclônica é observado nos baixos níveis da atmosfera no sul do Nordeste (Fig. 5.10a,b). A leste do Nordeste a vorticidade é fraca nos quatro níveis, enquanto que há núcleos intensos em latitudes médias, principalmente em 200 hPa (Fig. 5.10d).

As seções pressão-longitude do movimento vertical ao longo da latitude de 12°S mostradas na Figura 5.11 evidenciam áreas de movimentos ascendentes e descendentes em toda a troposfera nos quatro horários. É importante observar que Salvador fica próximo de 40°W nessas seções verticais. Na faixa longitudinal entre 40°W e 30°W, área dominada por circulação ciclônica às 00 UTC (Fig. 5.10a,b), há movimento ascendente em toda a troposfera, com máximo acima de 500 hPa (Fig. 5.11a). Às 06 UTC o movimento ascendente está presente entre a superfície e 400 hPa, com máximo na camada 700-600 hPa (Fig. 5.11b). Às 12 UTC o núcleo de movimento ascendente está menos intenso, mas se estende por toda a troposfera (Fig. 5.11c). É interessante observar que a chuva intensa ocorre entre esses dois horários, de acordo com a Figura 5.4. Às 18 UTC há movimento subsidente em toda a troposfera, próximo de 40°W (Fig. 5.11d).

Na Figura 5.12, que representa a distribuição da umidade específica nos baixos níveis da atmosfera no horário de 00 UTC, os valores chegam a atingir 14 g/kg no Nordeste, o que mostra o alto teor de umidade da região. Áreas de convergência de umidade são observadas na região de Salvador às 00, 06 e 12 UTC (Fig. 5.13a-c), em concordância com o movimento ascendente visto nos mesmo horários na Figura 5.11. Às 18 UTC já não existe convergência e sim, divergência de umidade.

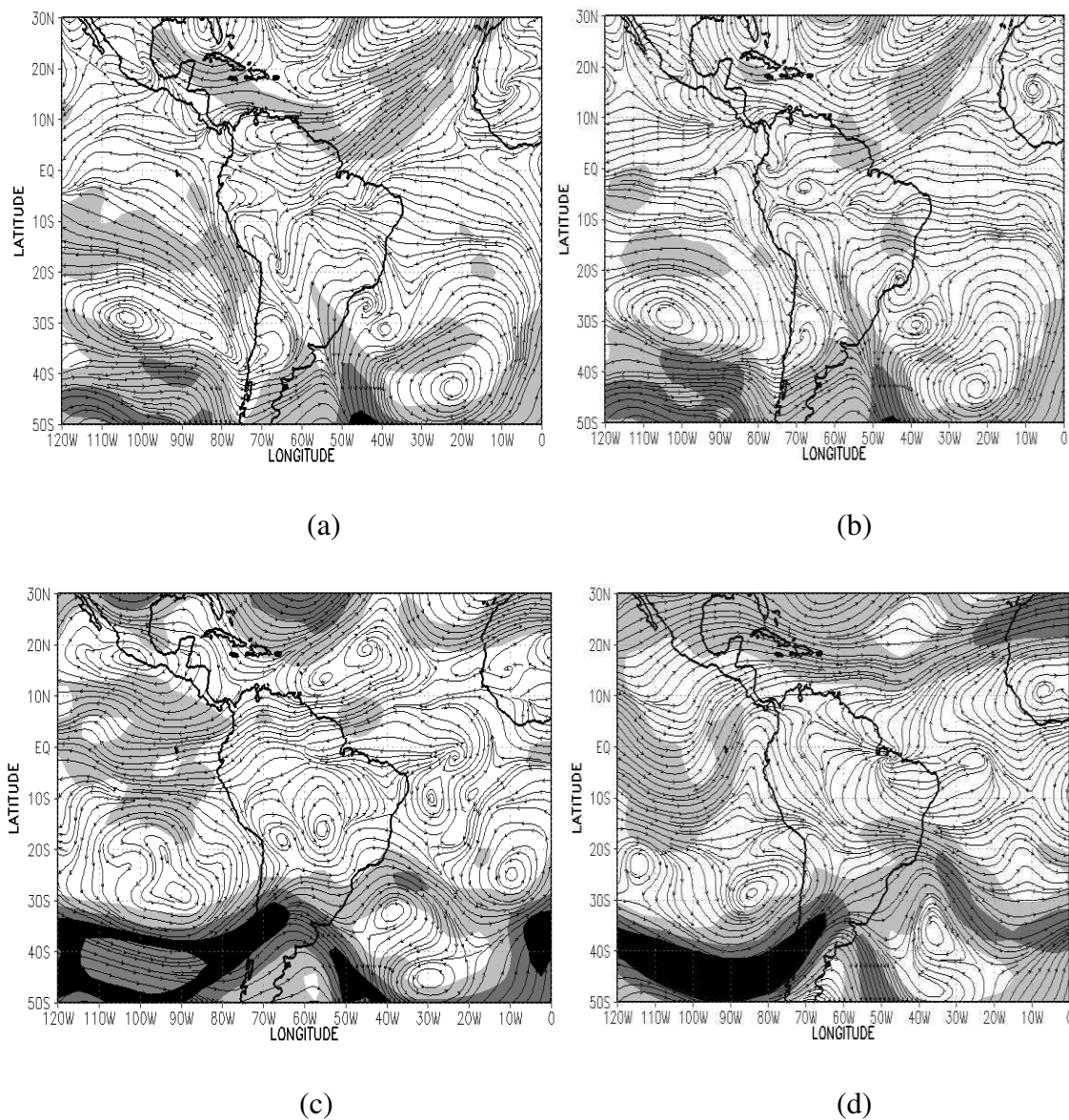


Figura 5.9 - Análise de linhas de corrente e intensidade do vento para as 00 UTC do dia 21 de abril de 2006 nos níveis de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A velocidade do vento está representada por: cinza escuro para  $60 \text{ m/s} \leq V$  ( $30 \text{ m/s} \leq V$ ) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para  $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$  ( $20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500 e 850 hPa) e cinza claro para  $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$  ( $10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500, 850 e 925 hPa). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

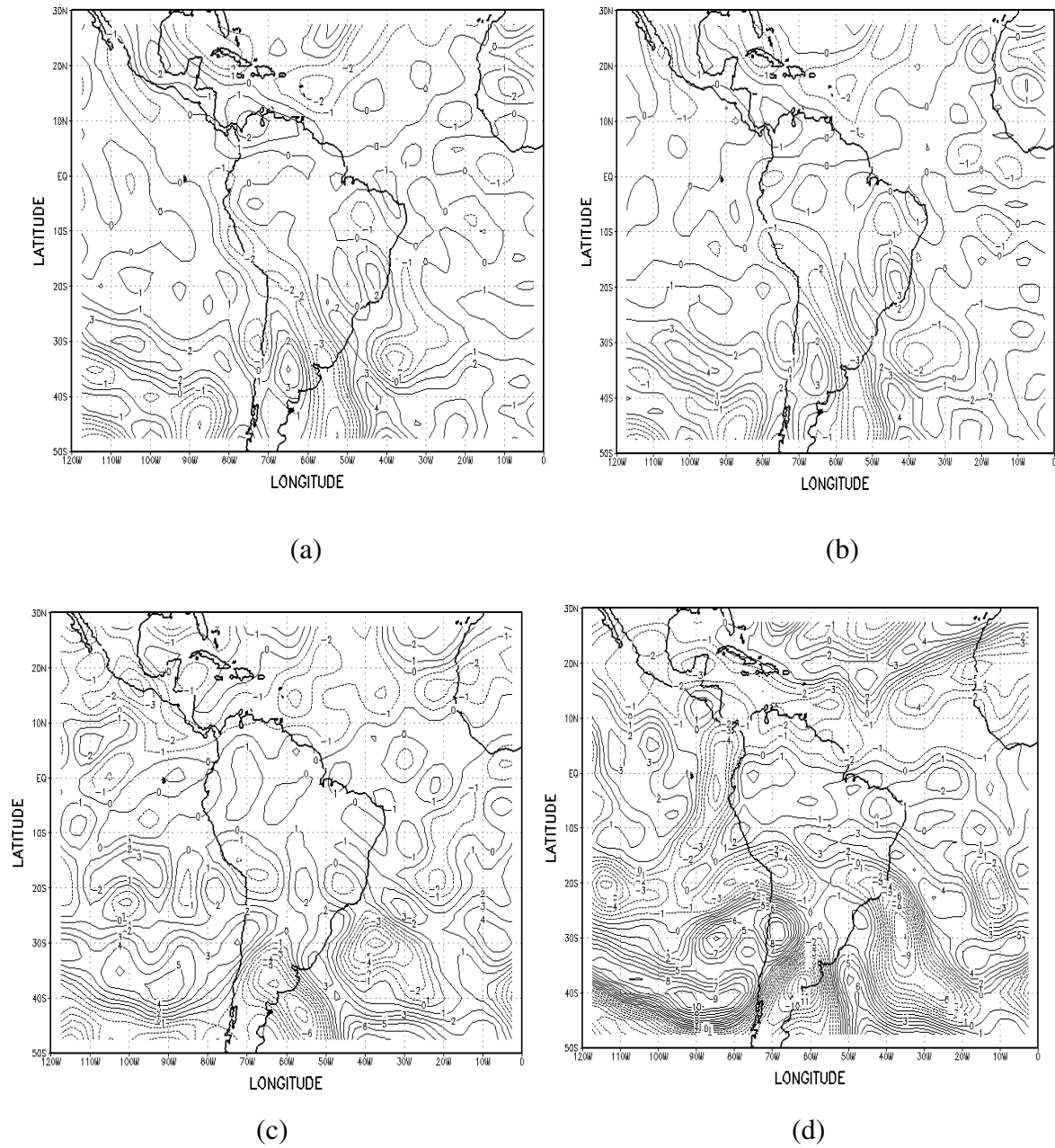


Figura 5.10 - Componente vertical da vorticidade relativa às 00 UTC do dia 21 de abril de 2006 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O intervalo de análise é de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

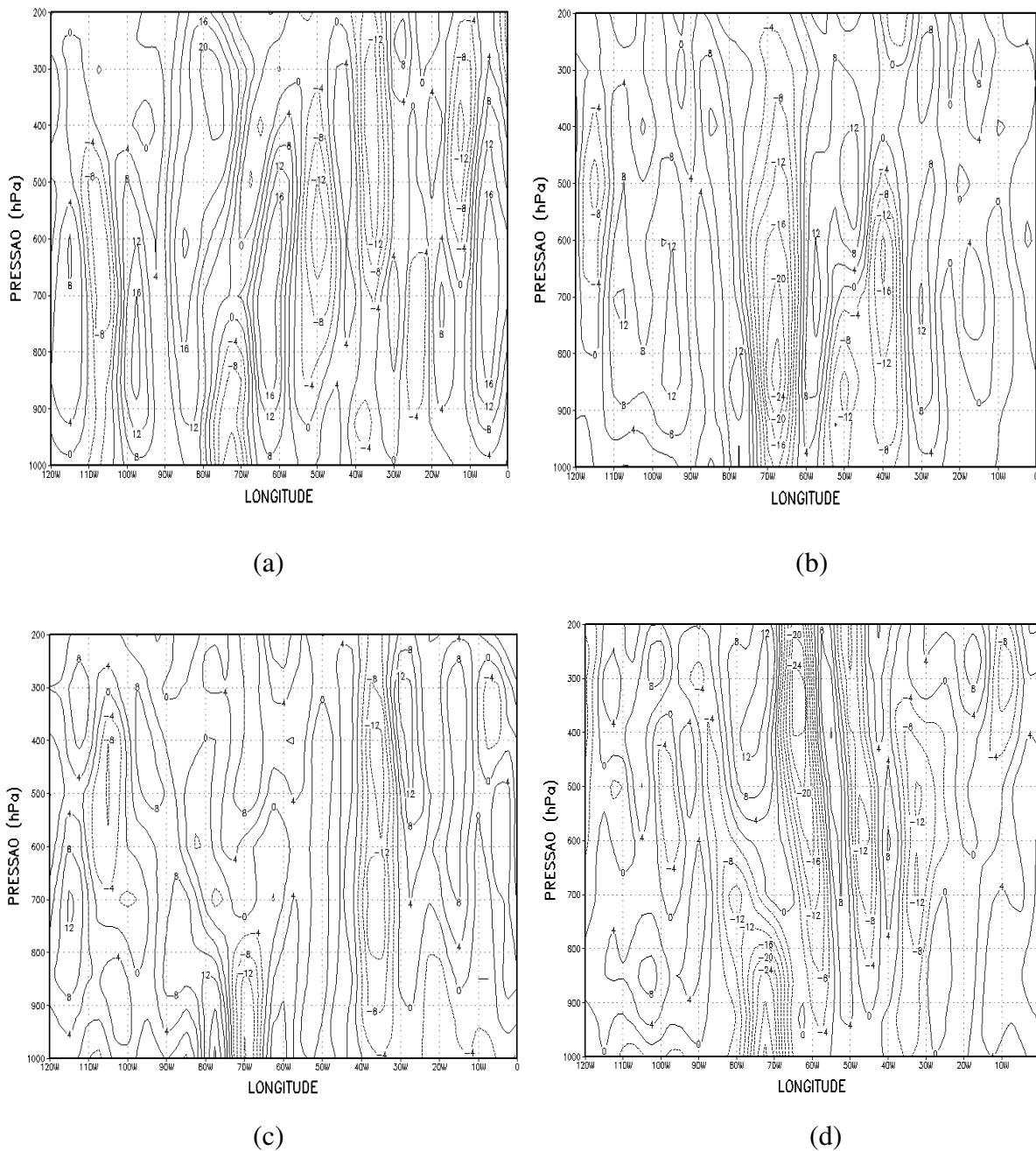
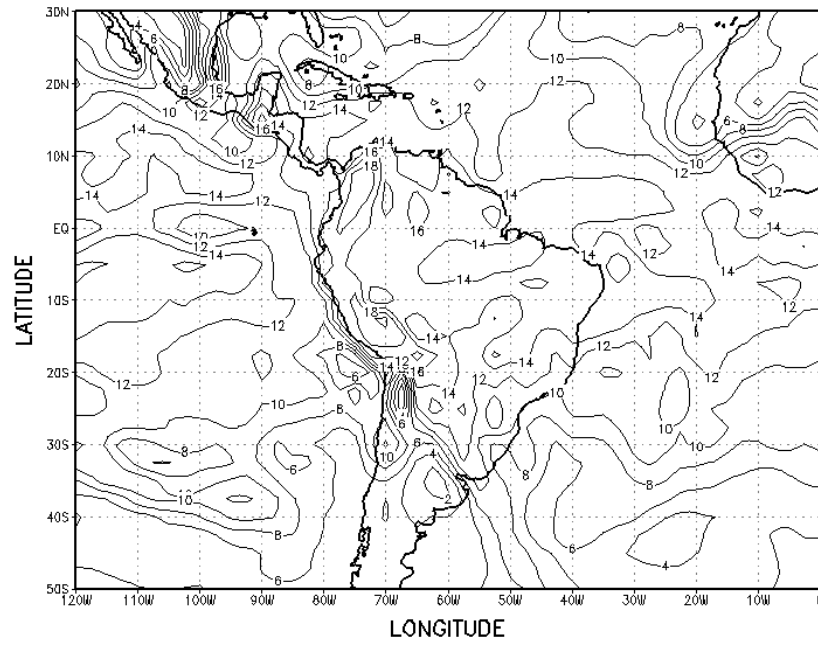
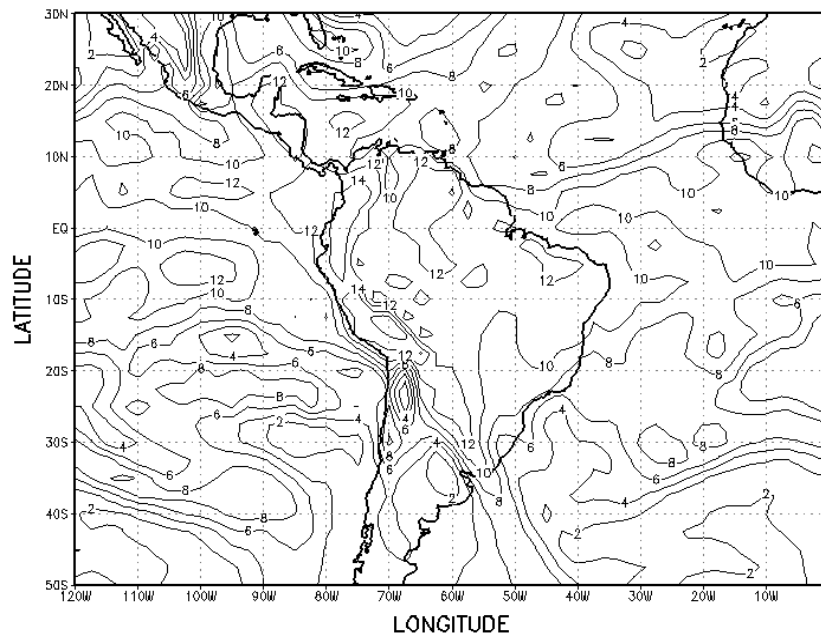


Figura 5.11 - Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 12°S no dia 21 de abril de 2006 no horário de: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de  $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).



(a)



(b)

Figura 5.12 - Umidade específica às 00 UTC do dia 21 de abril de 2006 no nível de: (a) 925 hPa e (b) 850 hPa. O intervalo de análise é 2 g/kg. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

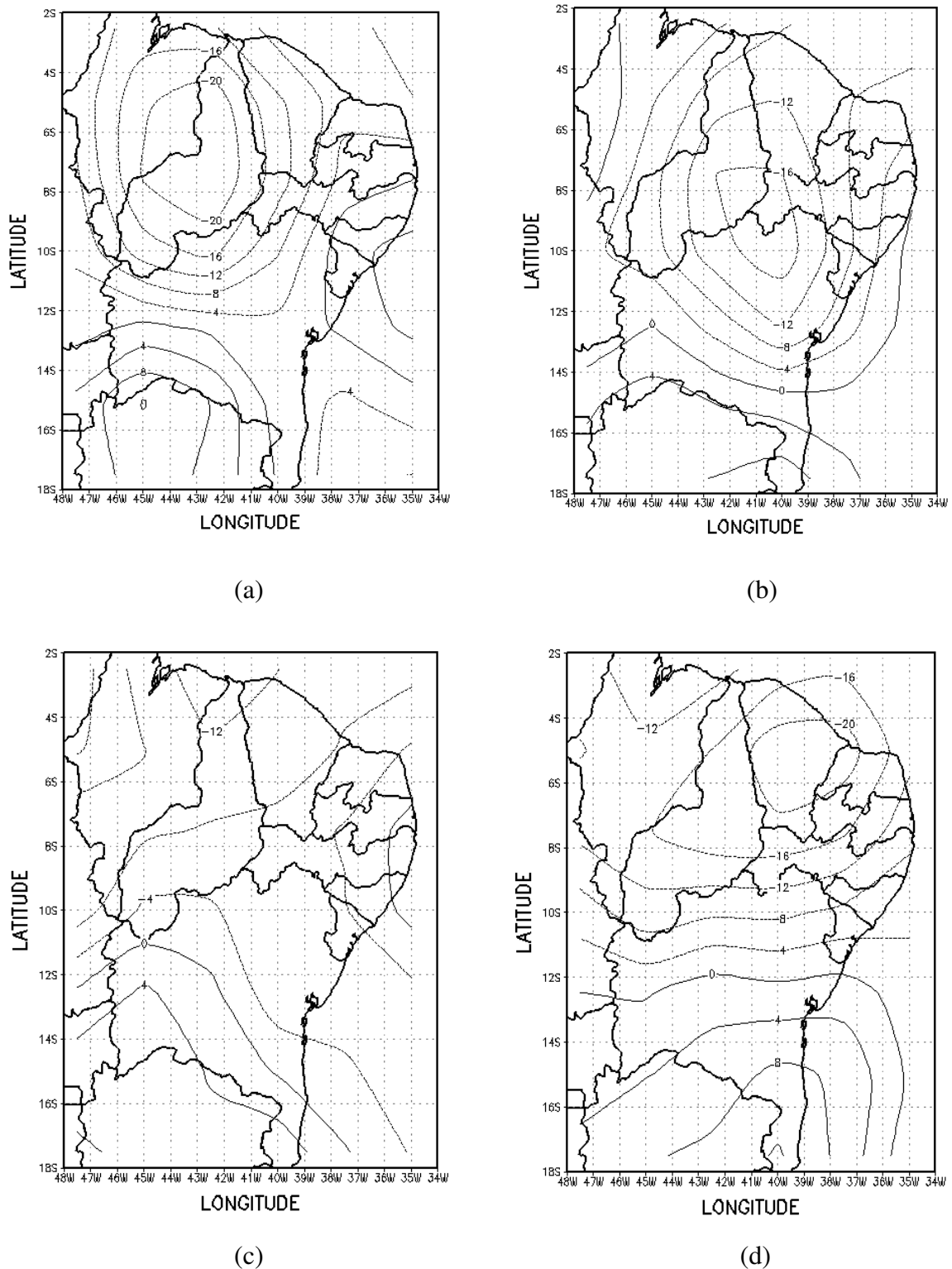


Figura 5.13 – Divergência horizontal do fluxo de umidade no nível de 925 hPa na Região Nordeste no dia 21 de abril de 2006 às: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de  $4 \times 10^{-7} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a divergência (convergência) de umidade. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).



## 5.2 – Junho de 2006

De acordo com informações da Defesa Civil da cidade de Salvador contidas no Relatório Final Operação Chuva 2006, junho de 2006 foi o mês que trouxe maiores conseqüências da temporada de chuvas na cidade. O solo já saturado e a ocupação de imóveis mal conservados ou construídos em locais inadequados e sem orientação técnica, estiveram associados à maioria dos desastres verificados em junho. Esta situação levou o prefeito a declarar Salvador em **Situação de Emergência** (reconhecimento legal pelo poder público de situação anormal, provocada por desastres, causando danos à comunidade afetada) nos dias 12, 13 e 14 desse mês.

Acidentes como deslizamentos de terra e desabamentos de imóveis foram os que mais provocaram danos durante eventos de chuva intensa do quadrimestre chuvoso de 2006, sendo que um desses deslizamentos provocou ferimentos em uma criança. Desabamento de imóveis e muros, rompimento da fiação elétrica, árvores caídas, obstrução de ruas também fizeram parte do conjunto de transtornos que Salvador enfrentou durante o evento de chuva intensa de junho de 2006. Através da Figura 5.14 é possível observar que as ocorrências do mês de junho se concentraram no dia 12.

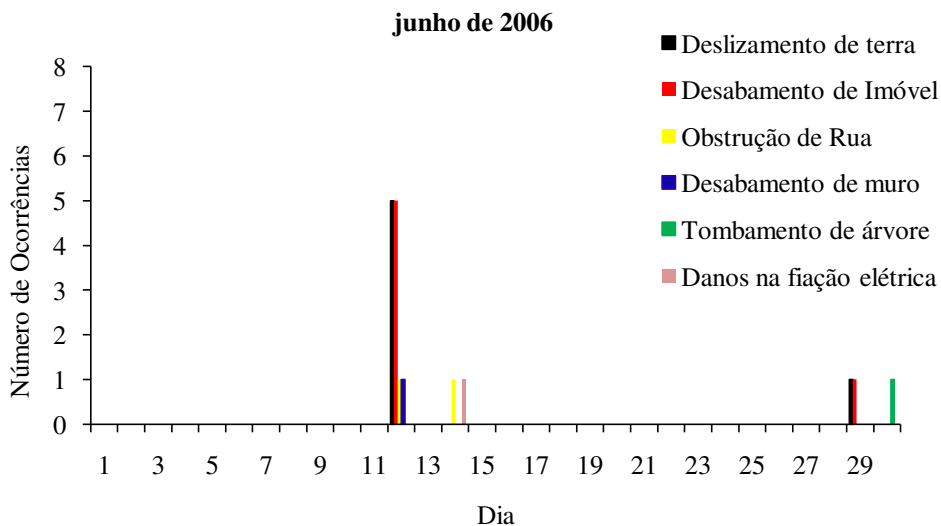


Figura 5.14 - Número de ocorrências dos acidentes mais relevantes relacionados com chuvas fortes no mês de junho de 2006 na cidade de Salvador. (*Fonte dos dados: Departamento de Informação da Defesa Civil de Salvador*).

O mês de junho de 2006 destacou-se pela intensidade e volume das chuvas observadas na cidade de Salvador no dia 12. A Figura 5.15 ilustra os totais diários de precipitação e mostra que as chuvas se fizeram presentes durante todo o mês; apenas nos dias 01, 02, 27 e 28 não houve totais pluviométricos. É possível notar através da figura que o dia 12 teve valores acima de 80 mm em três estações da cidade. A estação do INMET registrou 95 mm de chuva o que representa 38% da normal climatológica do mês, que é de 251 mm (Departamento Nacional de Meteorologia, 1992). A Figura 5.16 ilustra a variabilidade do vento nesse mês através das médias diárias das componentes u e v do vento em superfície e mostra que o vento, de modo geral, esteve relativamente fraco nesse mês. No dia 11 (dia anterior ao evento de chuva forte) o vento esteve no quadrante sudeste, passando para o quadrante sudoeste no dia 12.

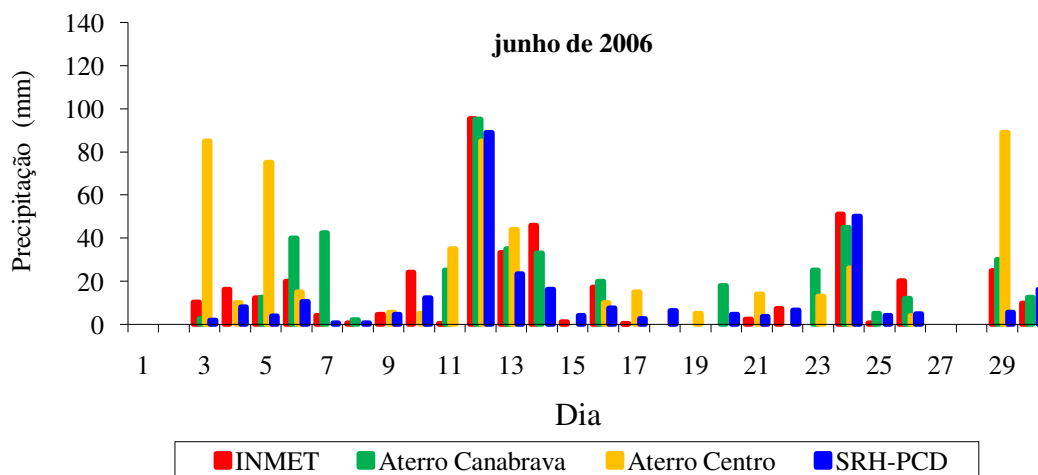


Figura 5.15 - Totais diários de precipitação (mm) do mês de junho de 2006 em quatro estações meteorológicas da cidade de Salvador. (*Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ*).

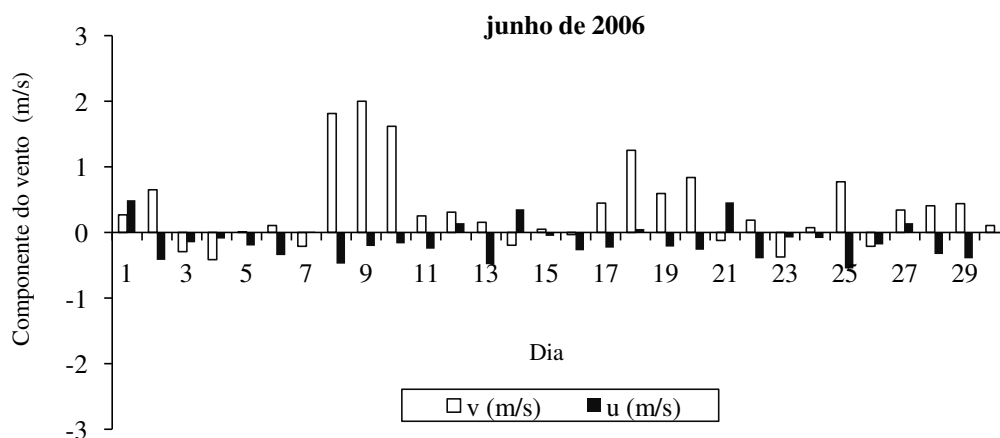


Figura 5.16 - Componentes zonal (u) e meridional (v) médias diárias do vento em superfície (m/s) registrado pela SRH-PCD de Salvador no mês de junho de 2006. (*Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ*).

A Figura 5.17, que ilustra a precipitação acumulada, mostra que a chuva começou fraca em Salvador no horário das 15 UTC do dia 11 de junho e foi aumentando gradualmente de intensidade, ficando forte a partir das 03 UTC, atingindo um máximo

entre 03 e 06 UTC. Nesse intervalo de três horas, a PCD registrou um total de 51 mm, valor que representa 20,5% da normal climatológica do mês de junho. A partir de 06 UTC a chuva cessa temporariamente.

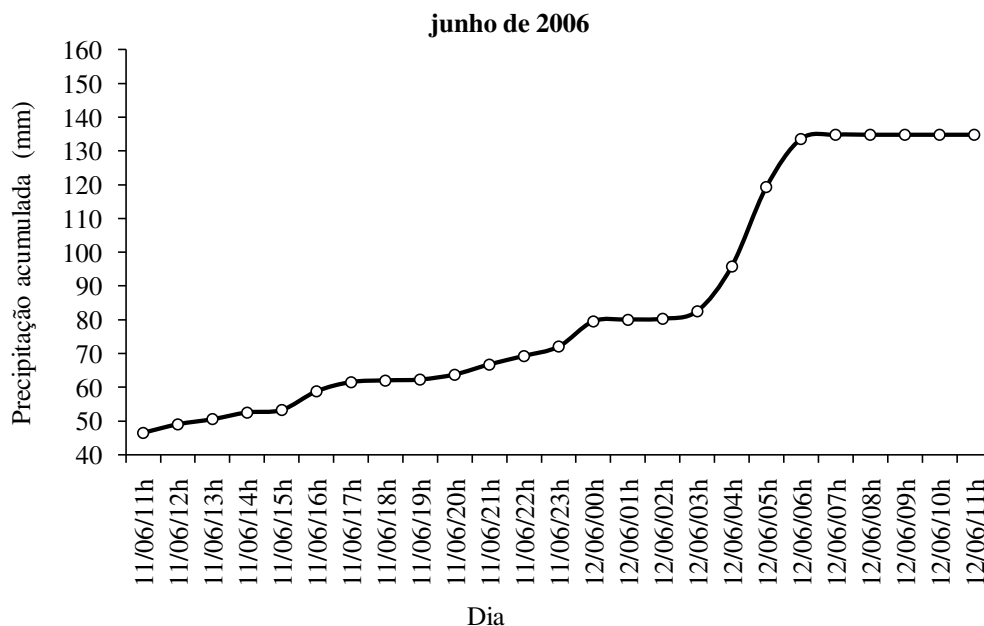


Figura 5.17 - Precipitação horária acumulada (mm) registrada pela SRH-PCD de Salvador no período de 11 UTC do dia 11 às 11 UTC do dia 12 de junho de 2006. (Fonte dos dados: Instituto de Gestão das Águas e Clima- INGÁ).

A Figura 5.18 ilustra os perfis verticais da temperatura potencial ( $\theta$ ), temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e temperatura potencial equivalente de saturação ( $\theta_{es}$ ) obtidas de sondagens realizadas às 12 UTC dos dias 11 e 12 de junho de 2006 em Salvador e Caravelas. No dia anterior (11 de junho) à ocorrência do evento de chuva forte, a atmosfera em Salvador (Fig. 5.18a) encontra-se relativamente úmida entre a superfície e 900 hPa, aproximadamente; nessa camada a atmosfera está condicionalmente instável, o que é ilustrado pela diminuição de  $\theta_{es}$  com a altura. No nível de 760 hPa, observa-se o afastamento entre as curvas de  $\theta_e$  e  $\theta_{es}$  caracterizando a base de uma camada de inversão térmica na qual há secagem na atmosfera. Este comportamento na região de Salvador caracteriza a presença de uma inversão de subsidência causada pelo domínio da ASAS. O perfil de  $\theta$  mostra que a atmosfera não se encontra bem misturada próximo à superfície. No dia 12, a proximidade entre as curvas de  $\theta_e$  e  $\theta_{es}$  indica que a atmosfera de Salvador encontra-se com alto teor de umidade até níveis mais elevados (Fig. 5.18c). Há instabilidade convectiva próximo à superfície. O valor da  $CAPE_{MÁX}$  para esse dia é de 2.977 J/kg enquanto que no dia anterior foi de 3.233 J/kg, o que representa condição favorável para grande atividade convectiva. Nos perfis de Caravelas (Fig. 5.18b,d) a atmosfera encontra-se úmida próximo à superfície no dia 12 de junho.

Os perfis verticais das componentes zonal e meridional do vento observado em Salvador e Caravelas são apresentados na Figura 5.19. No dia 11 o vento em Salvador (Fig. 5.19a) é bastante variável, alternando entre os quatro quadrantes em toda a troposfera. Em superfície é possível observar que o vento é do quadrante noroeste. No dia 12 os perfis mostram ventos fracos a moderados de nordeste e sudeste nos baixos níveis. É evidente entre os níveis de 700 e 500 hPa, o domínio de ventos do quadrante sudeste que são relativamente mais intensos do que o vento nos baixos níveis (Fig. 5.19c). Nos perfis de

Caravelas, a predominância é de ventos muito fracos no dia 11 e de ventos moderados a forte no dia 12, apresentando consideráveis mudanças em sua direção.

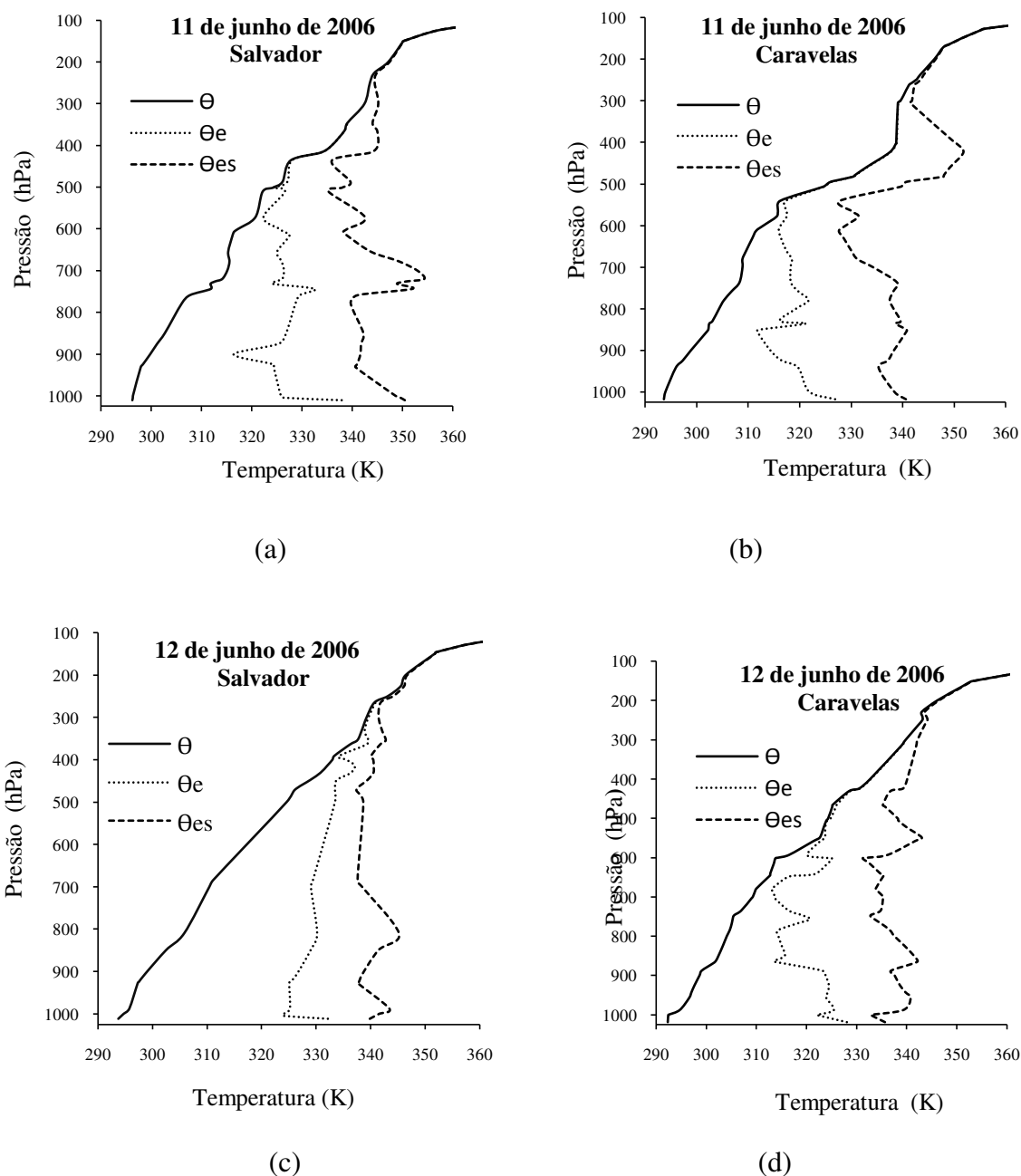


Figura 5.18 - Perfis verticais da temperatura potencial ( $\theta$ ), temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) e temperatura potencial equivalente de saturação ( $\theta_{es}$ ) obtidos de sondagens de ar superior realizadas em Salvador (a,c) e Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 11 e (c,d) 12 de junho de 2006. (Fonte dos dados: [www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)).

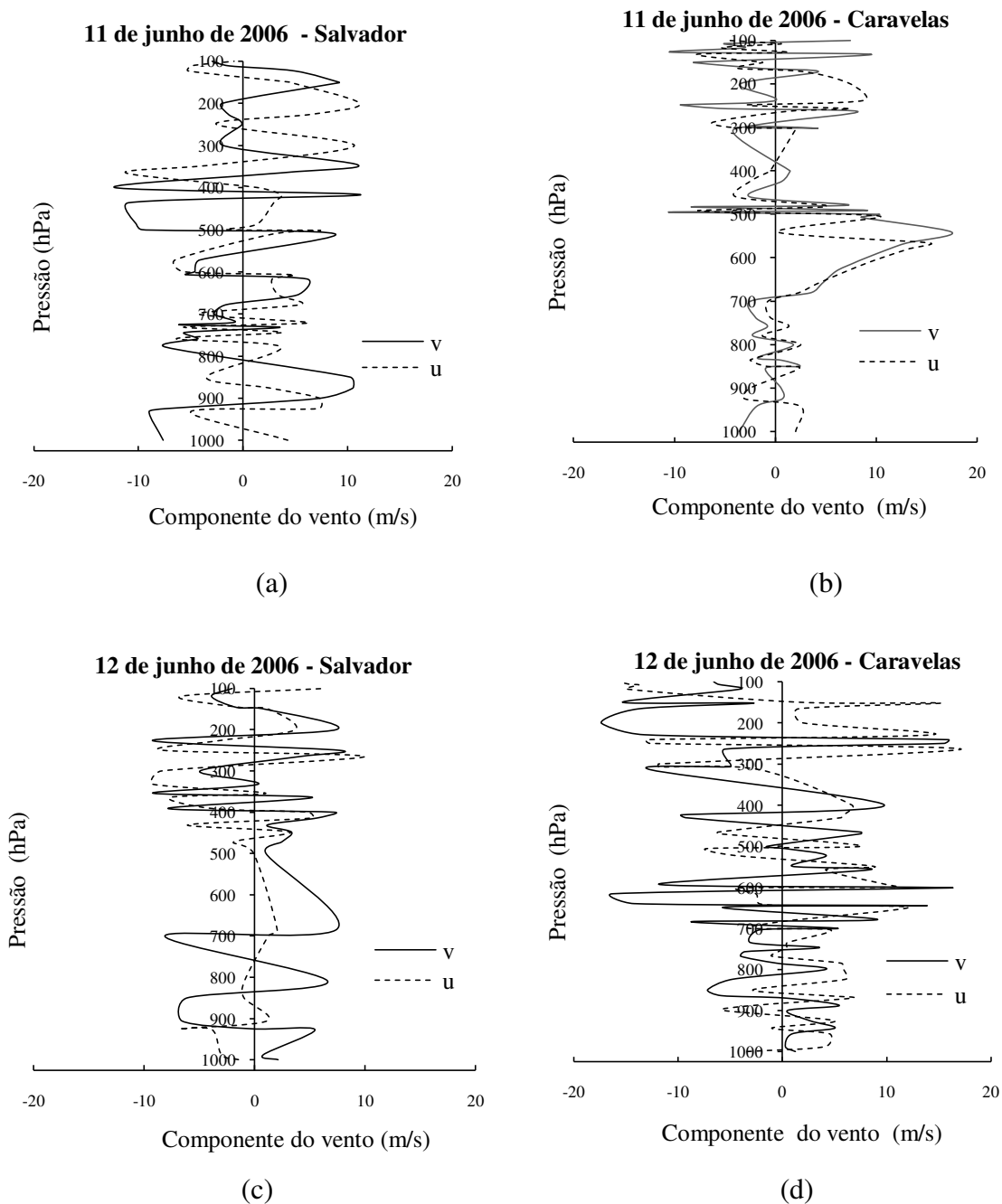


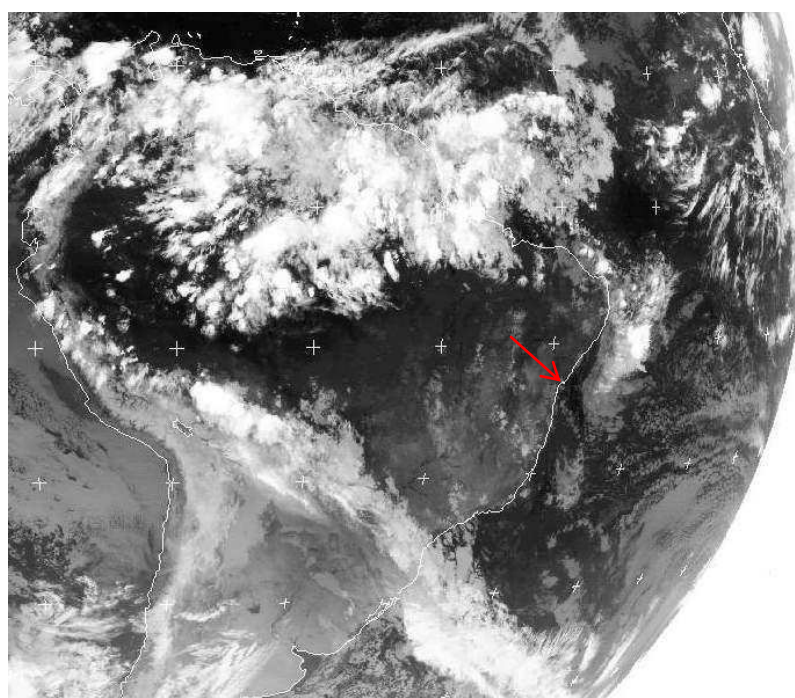
Figura 5.19 - Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m/s) obtidos de sondagens de ar superior realizadas na cidade de Salvador (a,c) e em Caravelas (b,d) às 12 UTC do dia: (a,b) 11 e (c,d) 12 de junho de 2006. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte). (Fonte dos dados: [www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)).

O desenvolvimento do evento extremo de chuva pode ser acompanhado através das imagens do satélite GOES-E obtidas em intervalos de 3 horas (Fig. 5.20). É possível observar já às 00 UTC do dia 11 de junho a formação das primeiras células de convecção profunda próximo à costa leste do Nordeste (Fig. 5.20a). O desenvolvimento prossegue ao longo do dia, aumentando consideravelmente a área coberta por nuvens (Fig. 20b,c). No dia 12 continua o desenvolvimento da convecção que passa a cobrir todo o setor leste do Nordeste e áreas oceânicas adjacentes (Fig. 5.20d-h). Outras áreas de nebulosidade são observadas no noroeste-norte da América do Sul. Um aspecto que merece destaque nessa área é a banda de convecção profunda ao longo do litoral norte do Nordeste às 21 UTC do dia 11 (Fig. 20c), numa configuração típica de linha de instabilidade favorecida pelo efeito de brisa. É possível notar também nas imagens a presença de uma banda de nebulosidade frontal que penetra na Região Sul-Sudeste e se desloca para o oceano.

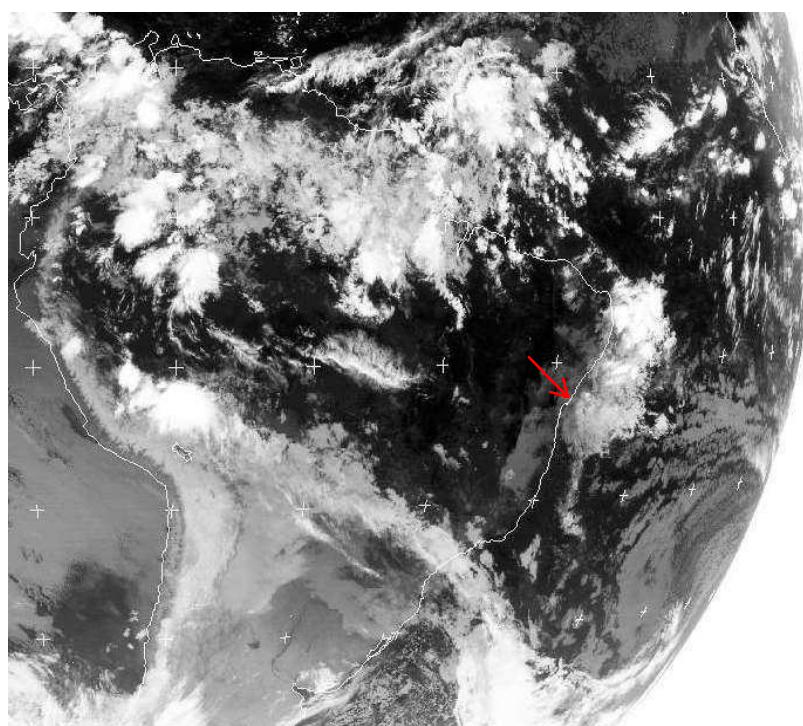
A análise de imagens de satélite de dias anteriores (não mostradas) evidencia células de nuvens com deslocamento de leste para oeste no oceano Atlântico culminando na nebulosidade discutida anteriormente. Propagação de leste pode ser também observada na seção tempo-longitude da componente meridional do vento no nível de 500 hPa para o mês de junho, ao longo da latitude de 5°S (Fig. 5.21). Nessa seção é possível observar uma propagação a partir da longitude de 5°W, com início em torno do dia 7. Não é possível observar propagação em outros níveis (não mostrado). Também não há evidência de propagação em 12°S, latitude próxima de Salvador.

A Figura 5.22 mostra o campo da pressão ao nível médio do mar às 00 UTC do dia 12 de junho, algumas horas antes do início do evento chuvoso. A ASAS está evidente com centro em torno de (27°S, 17°W), enquanto que outro centro de alta pressão é observado sobre o centro-leste da América do Sul, na retaguarda da frente fria identificada nas imagens de satélite. Um cavado com pequena amplitude é visto a leste do Nordeste.



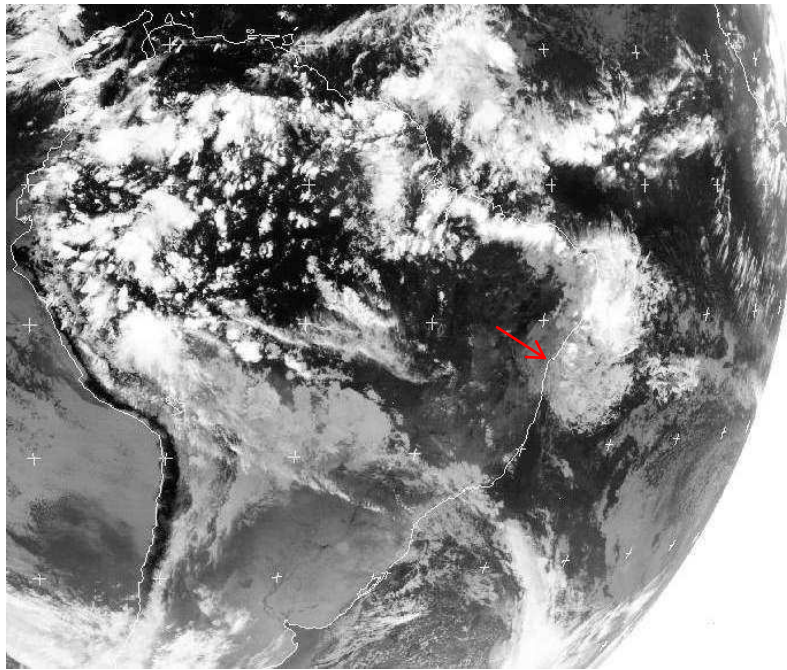


(a)

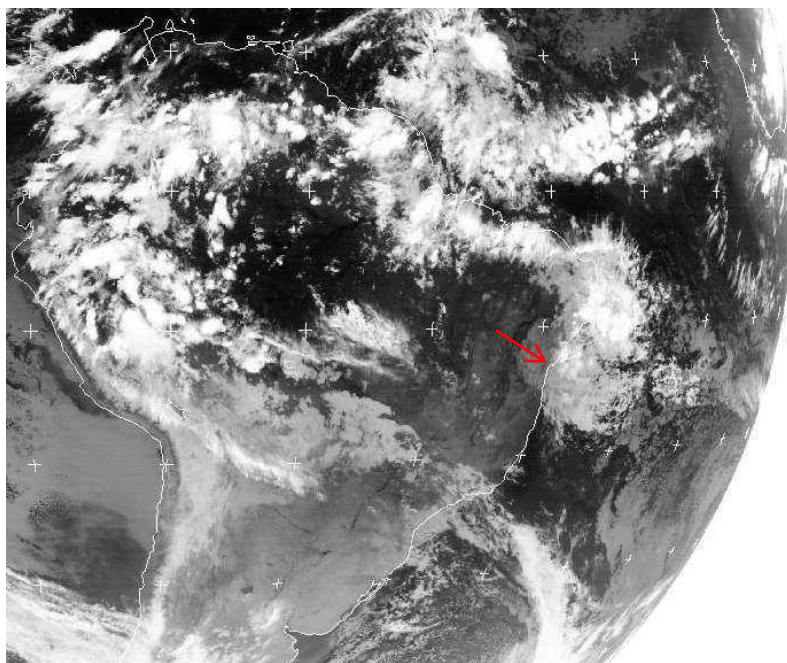


(b)

Figura 5.20 - Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 11 de junho de 2006 às 00 UTC (a), 12 UTC (b), 21 UTC (c), e dia 12 de junho às 00 UTC (d), 03 UTC (e), 06 UTC (f), 09 UTC (g) e 12 UTC (h). A localização aproximada de Salvador está indicada pela ponta da seta vermelha nas imagens. (Fonte das imagens: Adaptado de [www.sat.dundee.ac.uk](http://www.sat.dundee.ac.uk)).

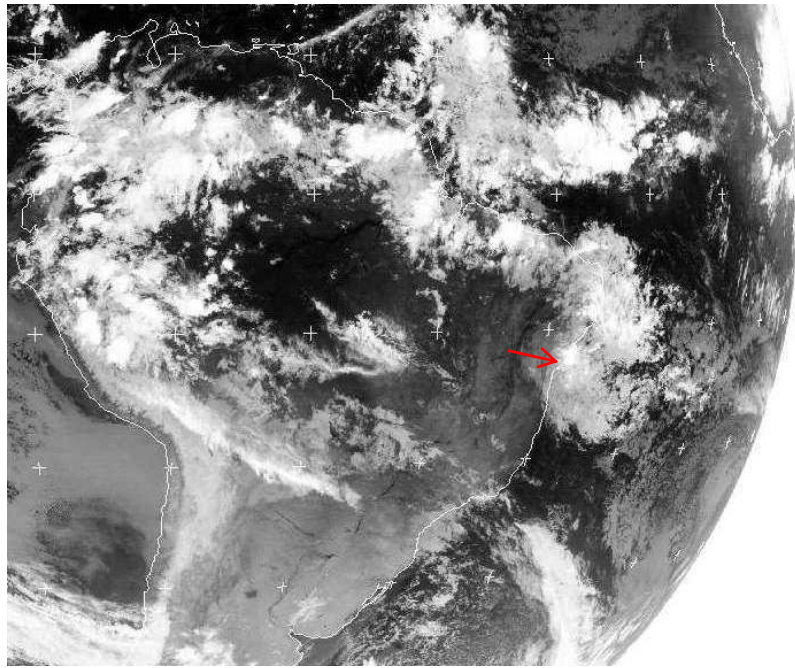


(c)

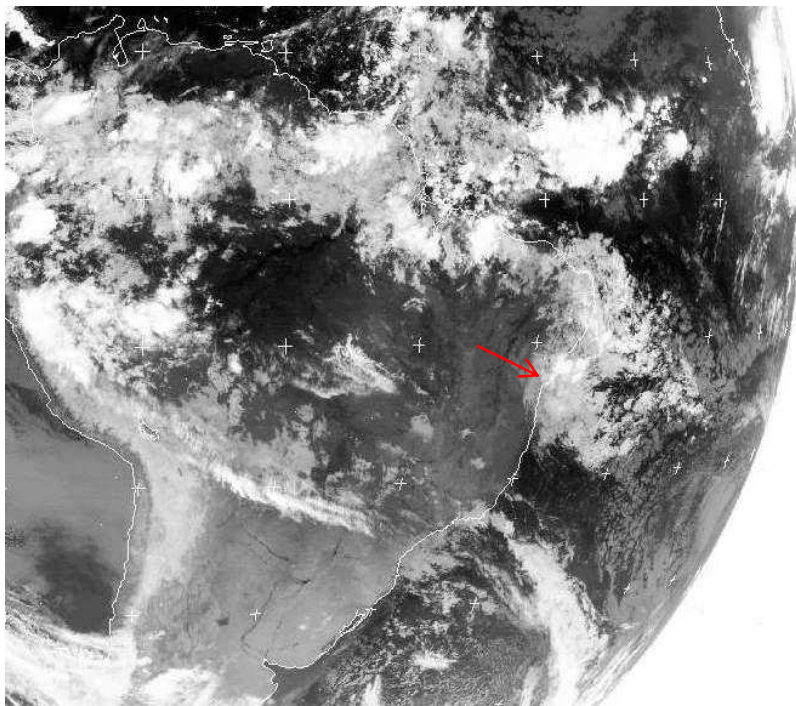


(d)

Figura 5.20 - Continuação

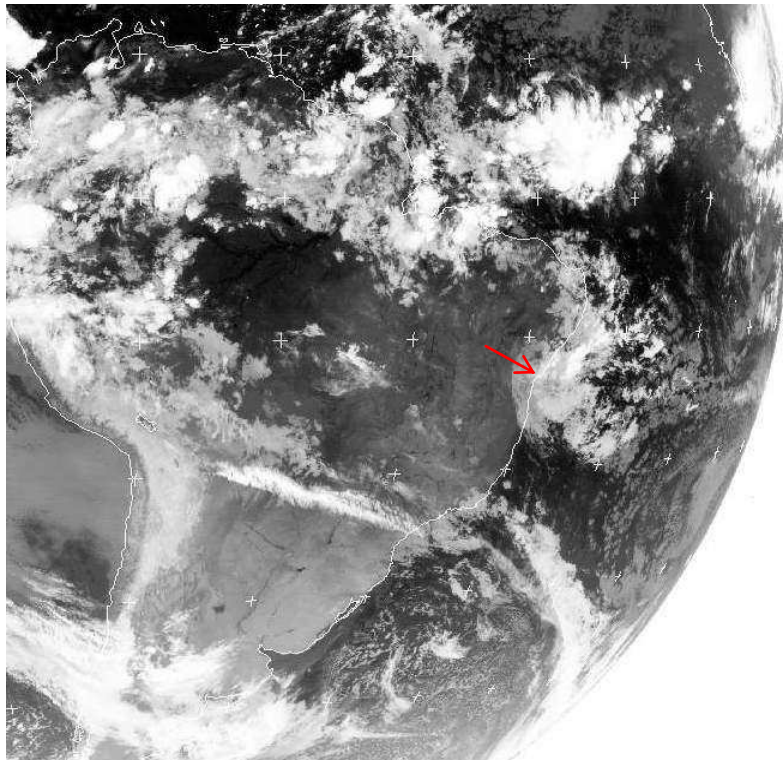


(e)

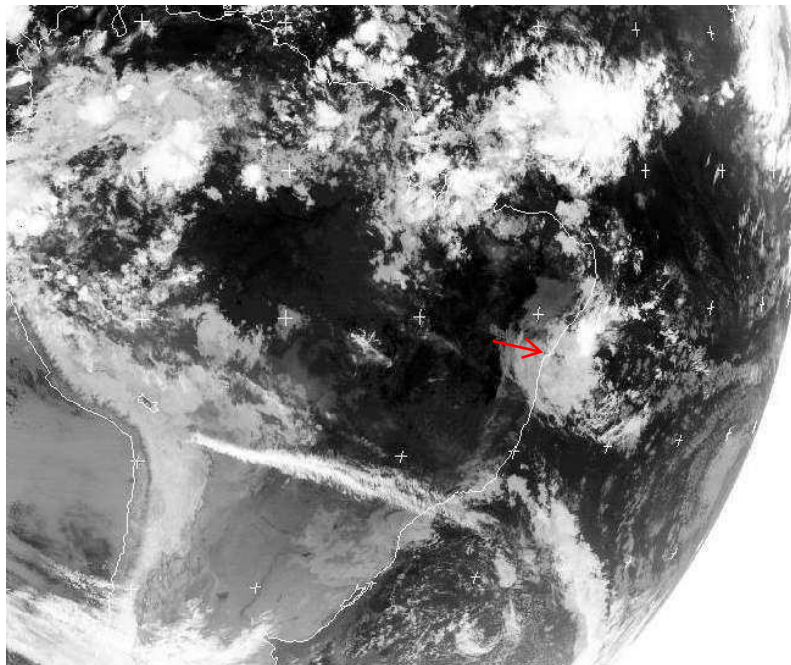


(f)

Figura 5.20 - Continuação



(g)



(h)

Figura 5.20 – Conclusão

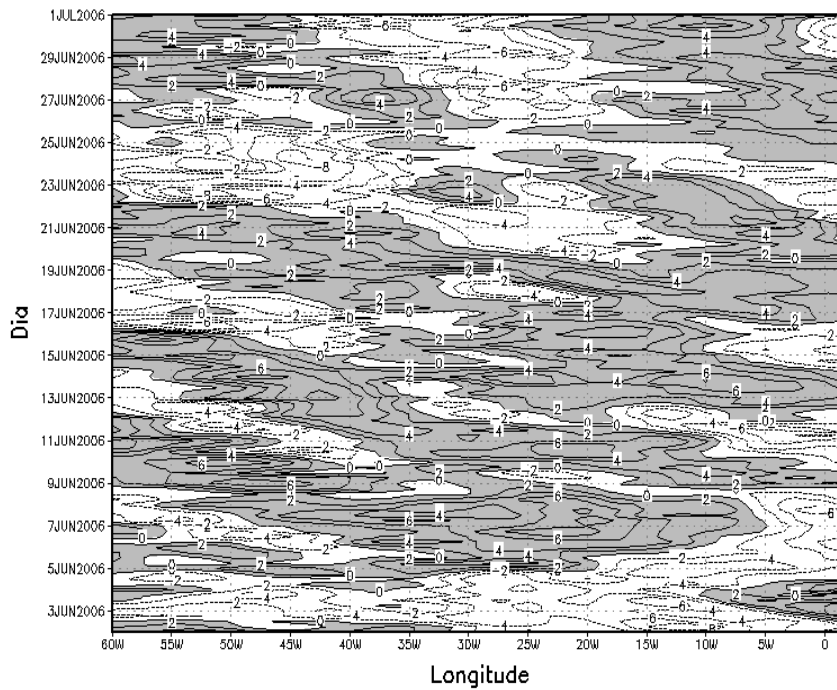


Figura 5.21 - Seção tempo-longitude da componente meridional do vento no nível de 500 hPa para o mês de junho de 2006 ao longo da latitude de 5°S. As áreas sombreadas assinalam componente de sul. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

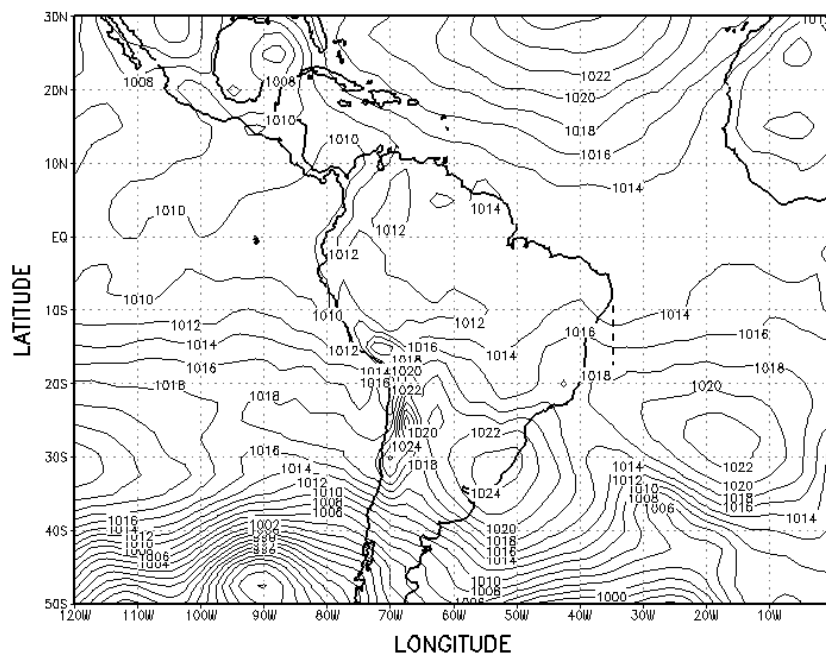


Figura 5. 22 - Pressão reduzida ao nível médio do mar às 00 UTC do dia 12 de junho de 2006. O intervalo de análise é de 2 hPa. A linha tracejada assinala um eixo de cavado. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

No campo do vento nos baixos níveis (Fig. 5.23a,b) observa-se a presença do núcleo anticiclônico da ASAS localizado sobre o Oceano Atlântico. Ainda nesses níveis (925 e 850 hPa) pode-se notar, próximo ao Nordeste, o cavado observado no campo da pressão. No nível de 500 hPa (Fig. 5.23c) há um cavado na área litorânea do Nordeste e um núcleo anticiclônico a leste, sobre o oceano. Esse núcleo está centrado no Nordeste em 200 hPa (Figura 5.23d). Nota-se também em latitudes subtropicais o cavado associado à nebulosidade frontal identificada nas imagens de satélite (Fig. 5.20). Esse cavado se estende ao sul de 20°S, a leste do continente, nos níveis de 925 e 850 hPa (Fig. 5.23a,b) e atinge latitudes mais baixas no nível de 500 hPa (Fig. 5.23c). No campo da vorticidade (Figura 5.24a,b) há um núcleo de vorticidade ciclônica sobre o leste do Nordeste em 925 e 850 hPa. Ainda nesses níveis é observado o núcleo de vorticidade ciclônica associado ao cavado de latitudes médias, centrado em torno de (35°S, 30°W). No nível de 500 hPa (Fig. 5.24c) é evidente a presença de vorticidade anticiclônica sobre o norte do Nordeste e área oceânica próxima. Esse núcleo continental também é visto em 200 hPa (Fig. 5.24d), enquanto que um centro de vorticidade ciclônica domina a leste de 30°W.

Analisando o movimento vertical através das seções pressão-longitude representadas na Figura 5.25, é possível notar nas proximidades de 38°W (longitude de Salvador), uma área de movimento ascendente na atmosfera às 00 UTC (Fig. 5.25a). Essa mesma área apresenta movimento ascendente mais forte, centrado abaixo de 500 hPa, às 06 UTC (Fig. 5.25b). Às 12 e 18 UTC (Fig. 5.25c,d), o movimento ascendente está mais intenso e se estende por toda a troposfera. O campo da umidade específica (Figura 5.26) para os níveis de 925 e 850 hPa (Fig. 5.26 a,b) mostra alto teor de umidade no Nordeste; valores de 10 a 14 g/kg são vistos no norte e leste da região. Convergência de umidade é vista no leste da Bahia apenas às 12 e 18 UTC (5.27c,d).

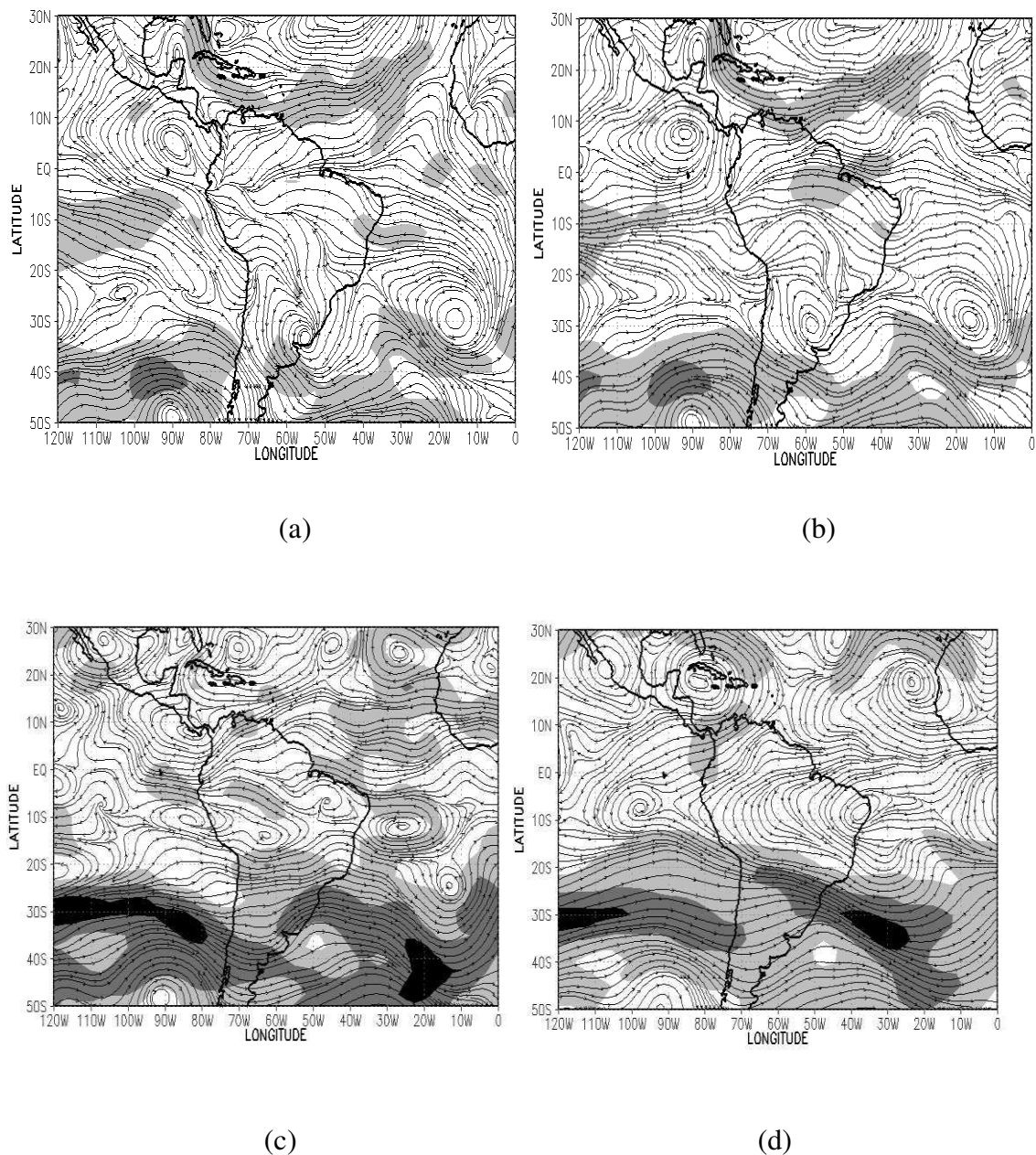


Figura 5.23 – Análise de linhas de corrente e intensidade do vento para as 00 UTC do dia 12 de junho de 2006 nos níveis de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. As velocidades do vento estão representadas por: cinza escuro para  $60 \text{ m/s} \leq V$  ( $30 \text{ m/s} \leq V$ ) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para  $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$  ( $20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500 e 850 hPa) e cinza claro para  $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$  ( $10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$ ) em 200 hPa (500, 850 e 925 hPa). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

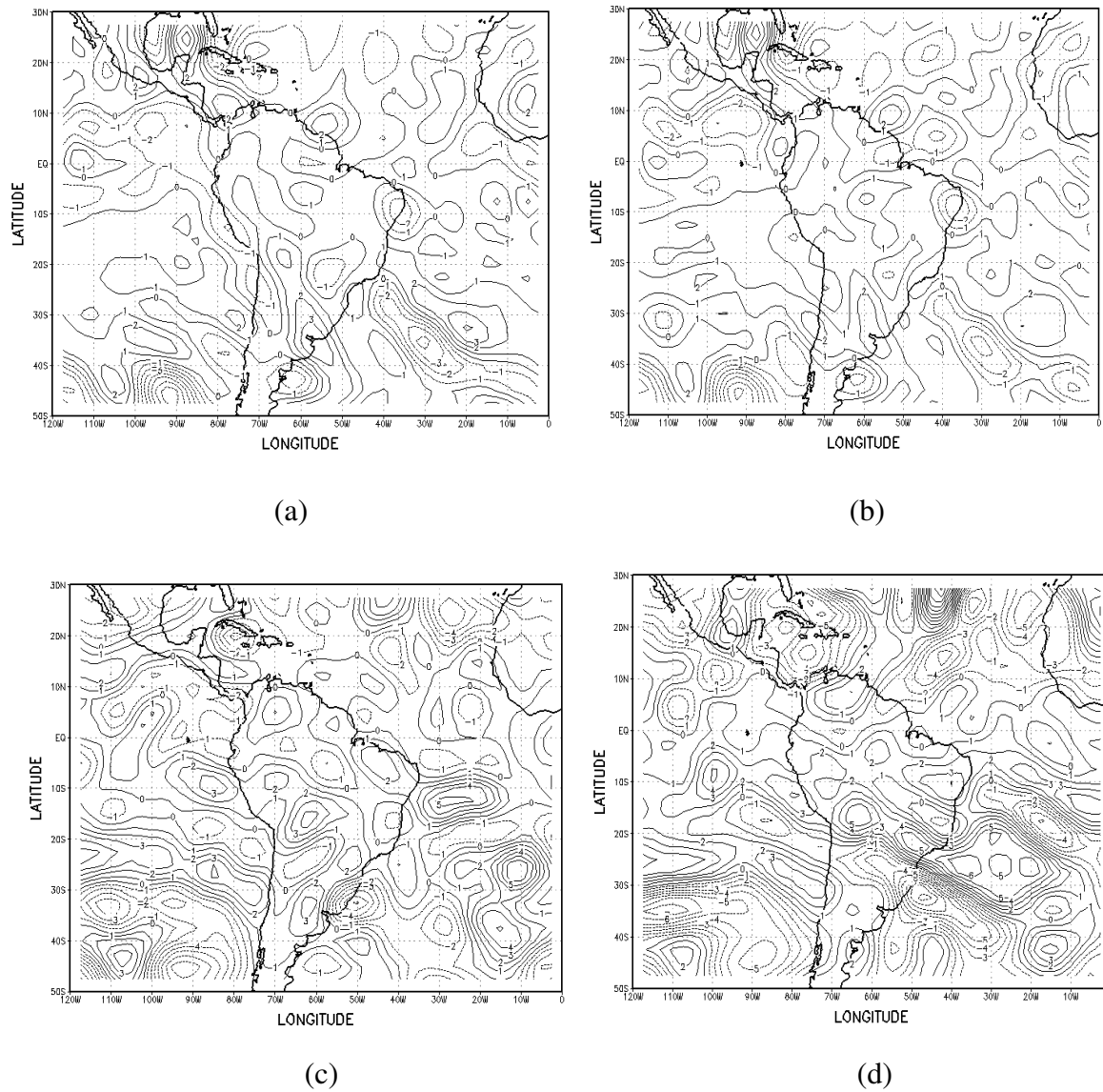


Figura 5.24 - Componente vertical da vorticidade relativa às 00 UTC do dia 12 de junho de 2006 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O intervalo de análise é de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).



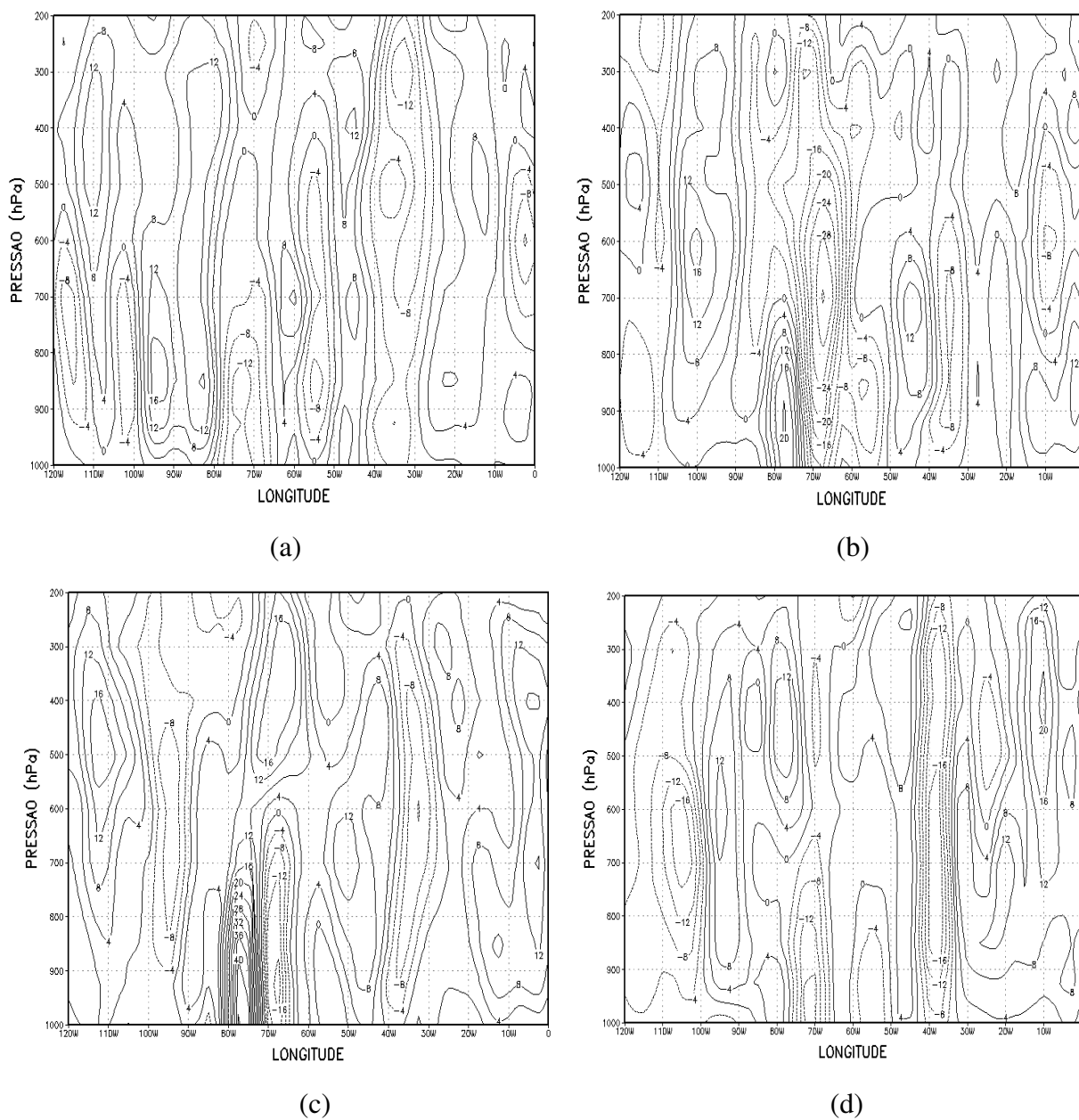
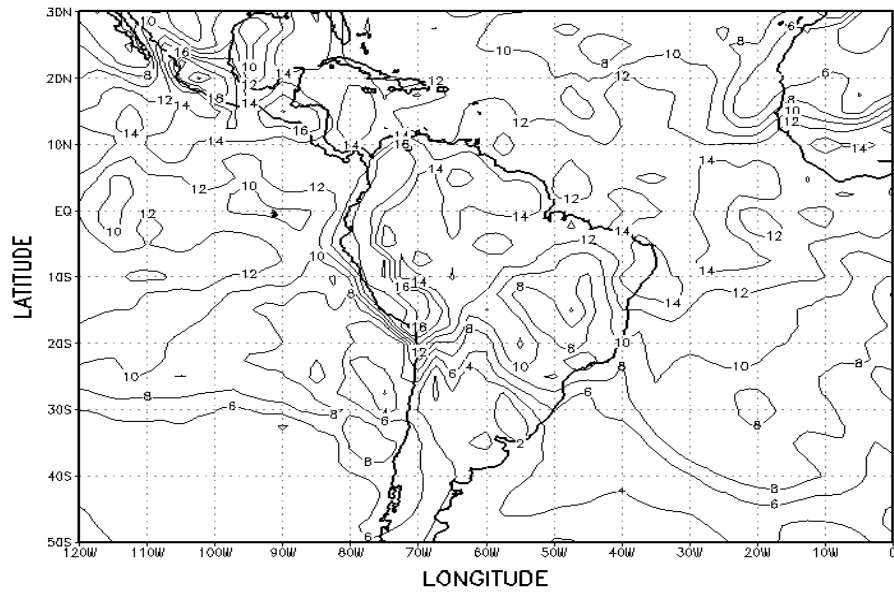
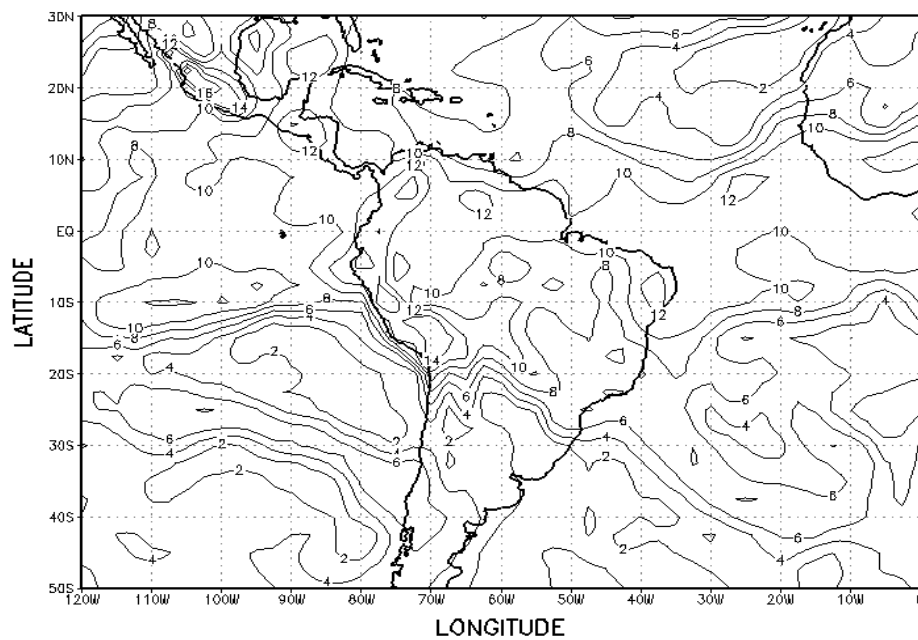


Figura 5.25 - Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 12°S no dia 12 de junho de 2006 no horário de: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de  $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).



(a)



(b)

Figura 5.26 - Umidade específica às 00 UTC do dia 12 de junho de 2006 no nível de: (a) 925 hPa e (b) 850 hPa. O intervalo de análise é de 2 g/kg. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

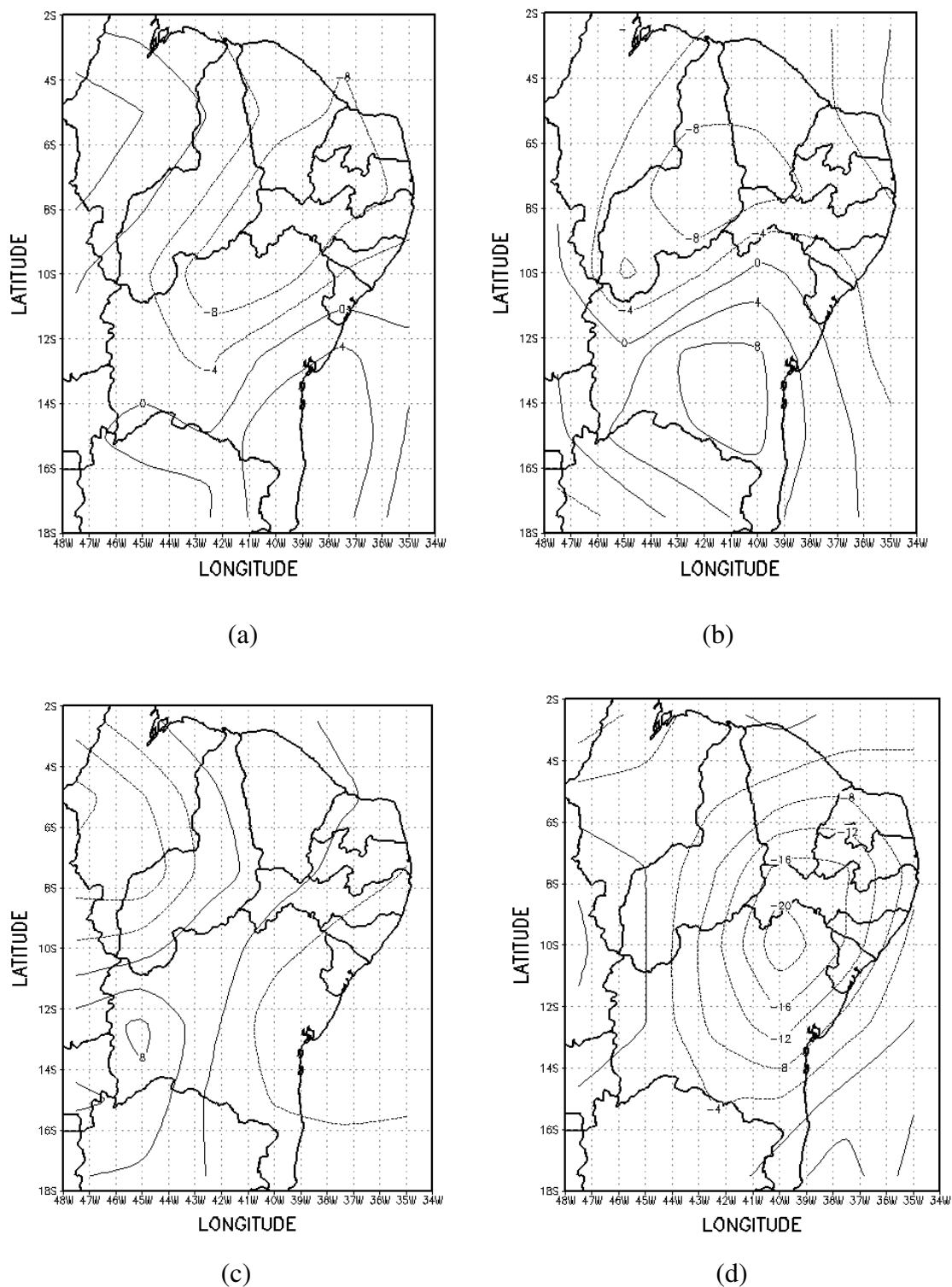


Figura 5.27 - Divergência horizontal do fluxo de umidade no nível de 925 hPa na Região Nordeste no dia 12 de junho de 2006 às: (a) 00 UTC, (b) 06 UTC, (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. O intervalo de análise é de  $4 \times 10^{-7} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a divergência (convergência) de umidade. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES**

Neste trabalho foram analisados eventos de chuva intensa ocorridos na cidade de Salvador–BA nos dias 21 de abril e 12 de junho de 2006 com o objetivo de diagnosticar a evolução do cenário sinótico-dinâmico em superfície e em altitude e mostrar impactos sócio-ambientais ocasionados pelos eventos. Os resultados foram obtidos através da análise de dados de reanálises do NCEP/NCAR com gradeamento de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , dados de superfície de estações convencionais e automática, sondagens de ar superior e dados de ocorrências registradas pela Defesa Civil de Salvador (CODESAL).

No evento de precipitação extrema ocorrido no início da manhã do dia 21 de abril, o avanço de um sistema frontal austral induziu a formação de um cavado sobre a área oceânica a leste da Região Nordeste, ocasionando convergência de umidade em baixos níveis e movimentos verticais ascendentes. Na manhã do dia 21 foi registrado um total de 55 mm de precipitação entre os horários de 08 e 10 UTC, sendo que o total diário foi de 110,6 mm o que representa 34% da normal climatológica do mês. Os perfis termodinâmicos de Salvador do dia anterior ao evento mostram que a atmosfera se encontrava condicionalmente instável, com teor de umidade elevado e energia potencial convectiva disponível máxima de 1680 j/kg, condições estas favoráveis à ocorrência de convecção. Ventos muito fracos na troposfera em Salvador e ventos fortes, em torno de 35 m/s, na alta troposfera em Caravelas também caracterizam o dia anterior ao evento. Os

principais desastres ocorridos na cidade foram relacionados a deslizamentos de terra e alagamentos.

A chuva forte que ocorreu na madrugada do dia 12 de junho foi causada por aglomerados convectivos decorrentes da configuração de um distúrbio de leste adjacente à costa leste do Nordeste detectado no escoamento de 500 hPa. Um total de 51 mm de precipitação foi registrado em apenas três horas (03 a 06 UTC), sendo o total diário de 95 mm, o que representa 38% da normal climatológica do mês de junho. As características termodinâmicas que antecederam esse evento mostram uma atmosfera condicionalmente instável e energia potencial convectiva disponível máxima de 3233 j/kg, condição muito favorável ao desenvolvimento de convecção na região de Salvador. Ventos fracos em Salvador e Caravelas em toda a troposfera foram observados no dia anterior ao evento. Desabamentos de imóveis e deslizamentos de terra foram os principais danos ocasionados por esse evento de chuva forte.

É interessante salientar que nos dois eventos as chuvas fortes ocorreram durante a madrugada e início da manhã e causaram muitos problemas na cidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. M. B.; TEIXEIRA, R. F. B.; FERREIRA, A. G. Um intenso Sistema Convectivo de Mesoescala no setor leste da Região Nordeste: O caso de 20 a 21 de maio de 1999. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 16, n. 1, p. 19-31, 2001.

ALVES, J. M. B.; FERREIRA, F. F.; CAMPOS, J. N. B.; ASSIS, F. S. F.; SOUZA, E. B.; DURAN, B. J.; SERVAIN, J.; STUDART, T. M. Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil durante janeiro/2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, n.1, p. 56-76, 2006.

ÁLVARES NETO, E. Problemática da drenagem em Salvador. *Revista VeraCidade – Ano I. n° 01 – Dezembro, 2006.*

BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F. Sistemas convectivos intensos no semi-árido brasileiro: O controle da grande escala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.3, 395-410, 2005.

BARRETO, A. B., SILVA ARAGÃO, M. R., CORREIA, M. F., SANTOS, A. H. M. Uma investigação sobre eventos de chuva intensa na cidade de Salvador, Bahia. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo. Anais. CD-ROM, 2008.

BLUESTEIN, H. B. Synoptic Dynamic Meteorology in Midlatitudes. New York: Oxford University Press, 1993. V2 Observations and Theory of Weather System, p. 426-455.

BOLTON, D. The Computation of Equivalent Potential Temperature. Monthly Weather Review. v. 108, 1046-1053, 1980.

CAVALCANTI, I. F. A; CERQUEIRA, F.; ROZANTE, J. R. Caso extremo de precipitação com ocorrência de deslizamento na Serra do Mar. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. Anais. CD-ROM, 2006.

CORREIA, M. F., Diagnóstico via radar dos sistemas precipitantes do semi-árido brasileiro: O evento de 1985. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, USP São Paulo, SP, 1989.

Defesa Civil de Salvador (CODESAL). Relatório final da Operação Chuva 2005 . (acesso em: 17 de novembro de 2007 no site: <http://www.defesacivil.salvador.ba.br/>).

Defesa Civil de Salvador (CODESAL). Relatório final da Operação Chuva 2006. (acesso em: 17 de novembro de 2007 no site: <http://www.defesacivil.salvador.ba.br/>).

Departamento Nacional de Meteorologia- DNMET. Normais Climatológicas (1961-1990), Brasília- Brasil. 1992.

DIAS, F. P.; HERRMANN, M. L. P. Susceptibilidade a deslizamentos: Estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis - SC. Caminhos de Geografia – Revista On Line. Programa de Pós- graduação em Geografia, 2002.

DIEM, J. E. Detecting rainfall enhancement within metropolitan Atlanta, Georgia USA. International Journal of Climatology, 28, 129-133, 2008.

FRANCIS, P. A.; GADGIL, S. Intense rainfall events over the west coast of India. Meteorology and Atmospheric Physics. 94, 27-42, 2006.

FERREIRA, M. A; BEZERRA, A. C; RIBEIRO, G. G. Eventos extremos de precipitação e de rajadas de vento na região amazônica e impactos sobre a população de Manaus –AM. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. Anais. CD-ROM. 2008.

GOSWAMI, P., RAMESH, K. V. Extreme rainfall events: Vulnerability analysis for disaster management and observation system design. RESEARCH COMMUNICATIONS, 2008.

GUIMARÃES, R. B.; GUERREIRO, J. A. S.; PEIXOTO, J. A. S. Considerações sobre os Riscos Ambientais e Urbanos no tocante aos Desastres e Emergências. Revista VeraCidade-Ano III - n° 03 – Maio, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas – IBGE. Disponível em [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br), acesso em: 29 set. 2007.



KAMAL, A.; Pakistan: Lai Nullah basin flood problem Islamabad-Rawalpindi cities. World Meteorological Organization/Global Water Partnership. Associated Programme on Flood Management. P. 01-12, January 2004.

KOUSKY, V.E. Frontal Influences on Northeast Brazil. Monthly Weather Review. v-107, 1140-1153, 1979.

LYON, B. Enhanced Seasonal Rainfall in Northern Venezuela and the Extreme Events of December 1999. Journal of Climate, v. 16, p. 2302-2306, 2002.

MOSCATI, M. C.; GAN, M. A. Um evento de precipitação extrema ocorrido no interior semiárido da região Nordeste do Brasil. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza. CD-ROM, 2004.

OLIVEIRA, L. L. Zonas de Convergência no Atlântico Sul e suas Influências no Regime de Precipitação no Nordeste do Brasil. São José dos Campos: Instituto de Pesquisas Espaciais, 2307 – TDL/074,125 pp.. São Paulo. 1982.

PAIVA NETO, A.C. Distúrbios de Leste: diagnóstico e relação com a precipitação no Estado da Paraíba em períodos de contraste. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande. Dissertação de Mestrado, 2003.

QUADRO, M. F.; GONÇALVES, L. G.; HOUSER, P. R.; GUPTA, H.; VANIN, A. T.; ROCHA, C. A.; SILVA, M. R.; LIBERATO, M. Relação entre sistemas meteorológicos e

desastres naturais ocorridos em Santa Catarina no ano de 2004. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. Anais. CD-ROM, 2006.

SANTOS, C. P. L.; Análise geofísica das características hidráulicas da falha de Salvador na região de Arembepé-BA. Universidade Federal da Bahia, Dissertação de Mestrado VIII, 93.; Il., mapas, 2003.

SANTOS, A. H. M; SILVA ARAGÃO, M. R; CORREIA, M. F; BARRETO, A. B. Chuvas intensas na cidade de Salvador, Bahia: o evento de novembro de 2006. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo. Anais. CD-ROM. 2008.

Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC). Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br>. Acesso em: 26 set. 2007.

SILVA ARAGÃO, M. R.; BARRETO, A. B.; ARAÚJO, H. A.; CORREIA, M. F. Desastres naturais na cidade de Salvador, Bahia: Evento chuvoso extremo em junho de 2006. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. Anais. CD-ROM, 2006.

SILVA, B. A. W.; AZEVEDO, M. M.; MATOS, J. S. Gestão Ambiental de Bacias Hidrográficas Urbanas. Revista Veracidade-Ano I-nº 01-Dezembro, 2006.

SIMÕES, T. K.; REIS, R. J. Análises das chuvas intensas nas estações chuvosas 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006 em relação às áreas de risco do município de Belo Horizonte. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. Anais. CD-ROM, 2006.

SOUZA, E. B.; ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. Um Complexo Convectivo de Mesoescala associado à precipitação intensa sobre Fortaleza-CE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 13, n.2, p. 01-14, 1998.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P.. Dynamical and Synoptic Characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Southern Brazil. *Monthly Weather Review*, v.135, p. 598-617. 2006

YAMAZAKI, Y.; ORGAZ, M. D. MM5 and an Extreme Precipitation of 1963 in Portugal. XXVIII Jornadas Científicas. *A Meteorologia e o Clima Atlântico. 5º Encontro Luso-Espânico de Meteorologia*. 247-258. 2004.